Die
Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft.

Von der

Königlichen Technischen Hochschule München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften
(Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Vorgelegt von

Friedrich Wamsler
Diplomingenieur aus München.

Referent: **Professor Dr. Oscar Knoblauch.**
Korreferent: **Professor Dr. Ernst Voit.**

München 1909.
Druck der Akademischen Buchdruckerei von F. Straub.

Die
Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft.

Von der

Königlichen Technischen Hochschule München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften
(Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

Vorgelegt von

Friedrich Wamsler
Diplomingenieur aus München.

Referent: **Professor Dr. Oscar Knoblauch.**
Korreferent: **Professor Dr. Ernst Voit.**

München 1909.
Druck der Akademischen Buchdruckerei von F. Straub.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555407_0036

Meinen Eltern.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 1

I. **Wärmestrahlung.**

A. Geschichtliche Entwicklung:

a) Dulong und Petit 3
b) Péclet 4
c) Rosetti 7
d) Stefan 8
e) Verschiedene Strahlungsgesetze 9

B. Versuche des Verfassers:

a) Theorie der Versuchsanordnung 12
b) Beschreibung der Versuchseinrichtung:
1. Strahlender Körper 16
2. Umgebende Hülle 19
3. Heizkörper 21
4. Oberflächentemperaturmessung 21
c) Durchführung der Versuche:
1. Eichung der Thermoelemente 25
2. Eigentlicher Versuch 26
3. Auswertung der Versuche 27
d) Versuchsergebnisse:
1. Untersuchte Stoffe 30
2. Vergleich und Überblick 40

II. **Gesamtwärmeabgabe oder Erkaltung.**

A. Geschichtlicher Rückblick:

a) Erkaltungsgesetze 43
1. Newton 43
2. Dulong und Petit 44
3. Péclet 45
4. Verschiedene Erkaltungsgesetze 46
b) Technische Untersuchungen:
1. mit Dampf oder Wasser als Wärmespender (Durchgangsversuche) 47
2. mit elektrischer Heizung 52
3. Versuche von Eberle 53

B. Versuche des Verfassers: Seite

a) Rechnerisches Verfahren 55

b) Versuchsanordnung:

1. Versuchsrohre und Heizkörper 57
2. Temperaturmessung 58
3. Versuchsraum 61

c) Durchführung der Versuche:

1. Eichung der Thermoelemente 62
2. Eigentlicher Versuch 62
3. Auswertung der Versuche 62

d) Versuchsergebnisse 64

1. Einfluß des Materials 65
2. Einfluß des Durchmessers 71
3. Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit 78

C. Zusammenfassung der wichtigsten Resultate vom I. Teil und II. Teil . 81

Die Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft.

Von **Friedrich Wamsler.**

Die Wärmeabgabe eines erwärmten Körpers im gaserfüllten Raum, wie z. B. diejenige geheizter Körper an Luft, kann in drei Vorgänge zerlegt werden, nämlich die Wärmestrahlung, die Wärmeleitung und die Wärmeströmung oder Konvektion. Die Wärmestrahlung beruht darauf, daß von jedem Körper eine Strahlung gewisser Intensität ausgeht, die von den Körpern der Umgebung teils absorbiert, teils reflektiert wird. Der durch Strahlung vor sich gehende Wärmeaustausch zwischen zwei Körpern ist dabei abhängig von der Temperatur derselben und von ihrer Oberflächenbeschaffenheit. Die Wärmeleitung des den erwärmten Körper berührenden Gases ist ein direkter Wärmeübergang von wärmeren zu kälteren Stellen, der dadurch vermittelt wird, daß ein Strom von Wärmeenergie in der Richtung entsteht, in welcher die Temperaturen abnehmen. Die Wärmeströmung endlich entsteht dadurch, daß sich die an dem heißeren Körper sich erwärmenden Luftschichten ausdehnen, spezifisch leichter werden und sich durch die kälteren, daher schwereren Luftteile nach aufwärts drängen lassen. Die Wärmeleitung und die Wärmeströmung sind im Gegensatz zur Wärmestrahlung Erscheinungen, welche infolge Berührung des Heizkörpers mit der Luft zustande kommen, sie sind unabhängig von dem Zustand der Körperoberfläche, sie hängen ab von dem Temperaturüberschuß des Körpers über die Temperatur der Umgebung und von der Form und den Dimensionen des wärmeabgebenden Teiles.

Will man nun die Gesamtwärmeabgabe eines Körpers in ihrer Abhängigkeit von den erwähnten Einflüssen feststellen, so erscheint es erforderlich, diese Teilvorgänge des Wärmeübergangs gesondert zu behandeln und dann durch Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse die Gesetzmäßigkeit des gesamten Wärmeübergangs von geheizten Körpern an Luft, d. h. der Erkaltung, festzulegen.

Die vorliegende Arbeit hat zu dem Ende folgenden Weg beschritten:

1. Es wurde zunächst die Wärmestrahlung verschiedener vorzugsweise für die Heizungstechnik in Frage kommender Materialien auf Grund einer neuen Versuchsanordnung untersucht. Diese Versuchsanordnung ermöglichte es, den Einfluß der Wärmeströmung durch Auspumpen zu beseitigen und den Betrag der Wärmeleitung der Luft rechnerisch zu ermitteln; der Rest ist dann die durch Strahlung abgegebene Wärme. An Hand der Versuchsergebnisse wurde dabei festgestellt, daß innerhalb des Intervalles von 0° bis 350° C. mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit die Intensität der Wärmestrahlung dieser Materialien proportional ist der vierten Potenz der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers. Der Proportionalitätsfaktor ist alsdann der für das Strahlungsvermögen der einzelnen Materialien maßgebende sogenannte Strahlungskoeffizient.

2. Alsdann wurde an verschiedenen im Handel gebräuchlichen Heizungsrohren im Temperaturbereich 0° bis 300° C. die Gesamtwärmeabgabe festgestellt und der Einfluß des Materials, der Oberflächenbeschaffenheit und des Rohrdurchmessers untersucht. Bringt man von dieser Größe den vorher bestimmten Anteil der Wärmestrahlung in Abzug, so kann auch der Vorgang der Wärmeleitung und Wärmeströmung näherer Betrachtung unterzogen werden. Setzt man die durch Wärmeleitung und Wärmeströmung von der Oberflächeneinheit in der Zeiteinheit abgegebene Wärme der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur des warmen Körpers und der Lufttemperatur proportional, so gelingt es für die mit wachsender Temperatur zunehmende Wärmeleitung und Wärmeströmung einen Proportionalitätsfaktor zu bestimmen. Es zeigte sich, daß auf denselben der Durchmesser des Rohres für Werte von 20,5 bis 89 mm, außen gemessen, wohl von Einfluß ist und zwar so, daß mit steigendem Durchmesser der Faktor der Wärmeabgabe geringer wird, während anderseits die Wärmeabgabe der Rohre durch Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit infolge Anstrichs mit Heizkörperfarben nur sehr unwesentlich beeinflußt wird. Die Versuchsergebnisse wiesen ferner darauf hin, daß der auf Wärmeleitung und Strömung bezügliche Wärmeübergangskoeffizient mit steigender Temperaturdifferenz rasch zunimmt.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate findet sich am Schluß der Abhandlung.

I. Teil.

Wärmestrahlung.

A. Geschichtliche Entwicklung.

Es mögen vor Entwicklung der theoretischen Grundlagen für die bei den Versuchen des Verfassers über Wärmestrahlung getroffene Versuchsanordnung zunächst die gebräuchlichsten Strahlungsgesetze und einige in der Praxis bisher verwendete Verfahren zur Bestimmung der Strahlungskoeffizienten in chronologischer Reihenfolge Besprechung finden.

Die ersten, welche ausführliche Versuche über die Abhängigkeit der Strahlung von der Temperatur unternahmen, waren Dulong und Petit,[1]) abgesehen von Newton,[2]) der allerdings nur ein Erkaltungsgesetz fand, welches im zweiten Teil dieser Abhandlung Besprechung findet. Die Versuchsanordnung von Dulong und Petit bestand darin, daß Thermometer mit kugelförmigem Quecksilbergefäß in ebenfalls kugelförmige, möglichst evakuierte und innen geschwärzte Hüllen aus Messing eingeführt wurden, welch letztere in ein großes, mit Wasser gefülltes Kupfergefäß von jeweils konstanter Temperatur eintauchten. Auf Grund der beobachteten Erkaltungsgeschwindigkeiten v_1 wurde dann folgende Gleichung formuliert, welche das sogenannte Gesetz von Dulong und Petit darstellt:

$$v_1 = m \cdot a^{\Theta}(a^t - 1),$$

worin m eine von der Oberflächenbeschaffenheit abhängige Konstante, $a = 1{,}0077$, Θ die Temperatur der Hülle und t die Temperaturdifferenz zwischen strahlendem Körper und Temperatur der Hülle darstellt. Im weiteren Verlaufe ihrer Versuche befaßten sich die Forscher noch mit der Erkaltung in einem mit Gas erfüllten Raum, worüber im zweiten Teil dieser Arbeit zu berichten ist.

Die Versuche von Dulong und Petit sind von vielen Forschern kritisch untersucht worden, zuerst von De la Provostaye und Desains,[3]) dann

[1]) Dulong und Petit, Ann. de chim. et de phys., Bd. 7, 113, 225, 228, 1817; Schweiggers Journ. 25.

[2]) Newton, Neutoni opuscula mathematica II, 423. Lausannae et Genevae 1744.

[3]) De la Provostaye und Desains, Ann. chim. et phys. (3) 12, 129, 1844; 16, 337, 1846; 22, 358, 1848.

u. a. von Draper,[1]) Violle,[2]) Grätz,[3]) und in letzter Zeit von Compan.[4]) Die Mehrzahl dieser Forscher hat sich gegen die Anwendbarkeit der Dulong-Petitschen Formel ausgesprochen, so auch Stefan,[5]) der wohl die wichtigste kritische Untersuchung dieser Formel geliefert hat, und dieselbe als eine rein empirische bezeichnet, welche die der Strahlung zugeschriebene Wärmeabgabe der zu den Versuchen verwendeten Thermometer genau wiedergibt. Stefan macht darauf aufmerksam und zwar unter Berufung auf Kundt und Warburg,[6]) sowie Winkelmann,[7]) daß die Größe der Wärmeleitfähigkeit der Luft von ihrer Dichte unabhängig ist und daß deshalb die von Dulong-Petit berechneten Abkühlungsgeschwindigkeiten nicht das Maß für die Wärmestrahlung des Thermometers bilden können, sondern nur das Maß für die Summe der Wärmestrahlung des Thermometers und der Wärmeleitung der Luft.

Wegen der irrigen Annahme über den Einfluß der Luft, welche in dem auf zwei bis drei Millimeter Quecksilberdruck ausgepumpten Reservoir noch zurückgeblieben und vernachlässigt war, und auf Grund der Tatsache, daß auch spätere Versuche von Dulong-Petit eine annehmbare Übereinstimmung mit der obigen Formel nicht mehr aufweisen, dürfen deshalb diese Grundlagen zur Auswertung der umfassenden Versuche, welche Péclet[8]) über die Wärmeabgabe angestellt hat, als nicht richtig bezeichnet werden.

Bei der allgemeinen Verbreitung, die Péclets Werte in der Heiztechnik gefunden haben und bei dem Vorhandensein verschiedener Mängel, die sich in seine Versuche eingeschlichen haben, erscheint es angezeigt, auf Péclets Versuchsanordnung näher einzugehen. Péclet brachte Gefäße verschiedener Form und Größe, die mit heißem Wasser gefüllt waren, kugelförmige von 3—5 cm Durchmesser und zylindrische von 3—30 cm Durchmesser bei 5—50 cm Höhe, mit jeweils veränderter Oberflächenbeschaffenheit in einen Raum von matter Oberfläche, der auf konstanter Temperatur gehalten wurde. Dann beobachtete er die Abkühlungsgeschwindigkeit eines feinen Quecksilberthermometers, welches in das innere, mit heißem Wasser gefüllte Gefäß tauchte. Für die in der Zeiteinheit abgegebene Wärmemenge M erhielt Péclet die Gleichung:

$$M = a\,t\,(1 + b\,t),$$

worin a und b konstante Zahlen sind, während t den Temperaturüberschuß darstellt. Die Gleichung stimmt mit einer von Dulong-Petit erhaltenen Formel innerhalb der angewendeten Temperaturgrenzen vollkommen überein.

---

[1]) Draper, Scientif. Memoirs, S. 44.

[2]) Violle, Compt. rend. **88**, 171, 1879; **92**, 866, 1204, 1881; **96**, 1033, 1883; **105**, 163, 1883.

[3]) Grätz, Wiedemanns Annalen **11**, 923, 1880.

[4]) Compan, Compt. rend. **136**, 813, 1202, 1901.

[5]) Stefan, Wiener Berichte **79**, 391, 1879.

[6]) Kundt und Warburg, Poggendorffs Annalen **156**, 177, 1875.

[7]) Winkelmann, Poggendorffs Annalen **156**, 497, 1875.

[8]) Péclet, Traité de la chaleur, Liège 1843. Deutsche Übersetzung von Dr. Karl Hartmann. Leipzig 1860.

Nun trennt er die durch Strahlung von der durch Berührung mit der Luft, also durch Leitung und Strömung der Luft, abgegebene Wärme und bezeichnet mit M die durch ein mit Kienruß geschwärztes Gefäß verlorene Wärmemenge, mit M' aber diejenige, welche durch dasselbe Gefäß bei gleicher Temperatur mit glänzender Oberfläche verloren ist. Ferner bezeichnet Péclet mit A die Wärmemenge, welche durch Berührung der Luft verloren geht und welche ja bei beiden Oberflächen gleich ist, mit R und R' den durch die Ausstrahlung des geschwärzten und des rein metallischen Gefäßes bewirkten Wärmeverlust. Dann ist:

$$M = A + R \quad \text{und} \quad M' = A + R'$$

und folglich:

$$M - M' = R - R'.$$

Nimmt man nun an, daß $R = c \cdot R'$, dann gilt ferner

$$M - M' = R'(c - 1) \text{ oder } R' = \frac{M - M'}{c - 1}.$$

Da aber

$$M = a \cdot t(1 + bt) \quad \text{und} \quad M' = a' t(1 + b' t), \qquad \alpha)$$

so wird:

$$R' = \frac{a - a'}{c - 1} \cdot t + \frac{ab - a'b'}{c - 1} \cdot t^2. \qquad \beta)$$

Aus diesem allgemeinen Ausdruck für den Wert von R' erhält man auch den von A, da ja

$$A = M' - R'.$$

Um das Verhältnis c der Ausstrahlungen $\frac{R}{R'}$ festzustellen, hat Péclet folgendes Verfahren angewendet, das auf einem der Gesetze von Dulong-Petit beruht:

Zwei Kupfergefäße, die einerseits von einer ebenen, senkrechten Fläche begrenzt sind, und die entweder unbedeckt bleiben oder mit verschiedenen Substanzen überzogen werden, stehen einander so gegenüber, daß ihre ebenen Oberflächen parallel sind und von einer thermoelektrischen Säule gleich weit abstehen. Eine der beiden Oberflächen wird auf konstanter Temperatur gehalten, während man die Temperatur der anderen so verändert, bis das in den Stromkreis der Thermosäule geschaltete Galvanometer auf Null zurückkommt. Bezeichnet man nun mit m und m' die Strahlungskonstanten der beiden Oberflächen, und mit t und t_1 die Überschüsse ihrer Temperaturen über die der Thermosäule, so hat man nach Dulong und Petit für die ausgestrahlten Wärmemengen

$$m a^{\Theta}(a^t - 1) \quad \text{und} \quad m_1 a^{\Theta}(a^{t_1} - 1)$$

und wenn diese Größen gleich sind, so erhält man

$$c = \frac{m}{m_1} = \frac{a^{t_1} - 1}{a^t - 1}.$$

Nachdem nun c bekannt war, konnte die durch Strahlung abgegebene Wärmemenge aus der gesamten abgegebenen mit Hilfe der obigen Gleichungen α) und β) berechnet werden. Für die durch Strahlung abgegebene Wärmemenge pro Stunde und Quadratmeter setzt dann Péclet

$$R = 124{,}72 \cdot K \cdot a^{\Theta} (a^{t} - 1).$$

Hier bedeutet Θ die Temperatur der Umgebung, t den Überschuß der Temperatur des strahlenden Körpers über die Temperatur der Umgebung, a eine konstante Zahl = 1,0077 und K eine von der Oberflächenbeschaffenheit abhängige Zahl. Für Temperaturunterschiede zwischen 25° und 65° C. kann nach Péclet folgende Annäherungsformel gesetzt werden:

$$R = Kt \cdot (1 + 0{,}0056\, t).$$

Für die durch Berührung mit der Luft transmittierte Wärme hat Péclet dann ebenfalls eine Gleichung angegeben, die im II. Teil vorliegender Arbeit besprochen ist.

Hier seien noch einige Werte von K nach Péclet angegeben, die besonderes Interesse bieten und bei Temperaturen von ca. 100° bzw. 15—17° festgestellt wurden.

Poliertes Silber . . .	0,130—0,140
Poliertes Rotkupfer . .	0,163
Zinn	0,212—0,215
Zink	0,240—0,262
Poliertes Messing . . .	0,258—0,260
Poliertes Schwarzblech .	0,453
Gewöhnliches Schwarzblech	2,77
Neues Gußeisen . . .	3,17
Bausteine und Gips . .	3,60
Feiner Sand	3,62
Kienruß	4,01
Wasser	5,31
Öl	7,24.

Die von Péclet gefundenen Resultate sind nun aus verschiedenen Gründen anfechtbar, wie schon Grashof,[1]) Paul,[2]) Nusselt[3]) u. a. mehr erörtert und wie sich auch durch Versuche[4]) an technischen Anlagen gezeigt hat, wo die Pécletschen Formeln zu kleine Werte ergaben. Zunächst beruhen sie, wie schon erwähnt, auf den unter falschen Voraussetzungen über die Wärmeleitfähigkeit der Luft entstandenen Formeln von Dulong-Petit. Daß

---

[1]) Grashof, Theoretische Maschinenlehre, S. 942, 1875.

[2]) Paul, Lehrbuch der Heizungs- und Lüftungstechnik, S. 171. Wien 1895.

[3]) Nusselt, Dissertation über die Wärmeleitfähigkeit von Wärmeisolierstoffen. Techn. Hochschule, München 1907; s. auch Mitteilungen über Forschungsarbeiten, herausgegeben vom Verein Deutscher Ingenieure, Heft 63/64, 1909.

[4]) P. G. Laurin and Wallin, Om profning of värme isoleringsmedel. Teknisk Tidskrift 1901. Hausbrand, Verdampfen, Kondensieren und Kühlen. 1909.

die aufgeführten Strahlungskoeffizienten nicht einwandfrei sein können, geht daraus hervor, daß Péclet für Wasser 5,31 und für Öl 7,24 findet gegenüber 4,01 bei Kienruß, so daß also diese Substanzen ein größeres Wärmestrahlungsvermögen besitzen würden als Kienruß. Dagegen strahlt aber nach dem Kirchhoffschen Gesetz[1]) der absolut schwarze Körper, d. h. ein solcher, der alle auffallenden Wärmestrahlen absorbiert, wie dies bei Ruß nahezu der Fall ist, am meisten Wärme aus. Péclet setzt ferner bei Bestimmung des Verhältnisses c

$$R = R' \text{ bzw. } m \cdot a^{\Theta}(a^t - 1) = m_1 \cdot a^{\Theta}(a^t - 1),$$

nachdem er die Temperatur des einen Gefäßes so lange geändert hat, bis das Galvanometer auf Null steht. Dies ist aber nur dann richtig, wenn die Thermosäule ein absolut schwarzer Körper ist, was jedoch aus physikalischen Gründen ausgeschlossen erscheint. Schließlich setzt Péclet für die Temperatur der Thermosäule die Temperatur der Umgebung ein, die vermutlich höher ist und endlich müssen die Temperaturen der ebenen Wände an ihren die Luft berührenden Oberflächen immerhin etwas kleiner sein als die von Péclet dafür gesetzten Wassertemperaturen.

Nach Péclet war es zunächst Rosetti,[2]) der ein Gesetz für die Strahlung aufstellte, dem er folgenden Ausdruck verlieh

$$S = (a\,T^2 + b)\,(T - T_1)$$

und zwar auf Grund von direkten Beobachtungen mit der Thermosäule. In der Rosettischen Formel bedeutet T die absolute Temperatur des strahlenden Körpers, T_1 die absolute Temperatur der Umgebung, a und b sind konstante Zahlen. Rosetti verwendete zu seinen Versuchen zwischen 0 und 100° einen mit Wasser gefüllten, zwischen 100 und 300° einen mit Quecksilber gefüllten, berußten Leslieschen Würfel[3]) und setzte die Größe der Strahlung direkt proportional den am Galvanometer der Thermosäule gemessenen Ablenkungen der Magnetnadel. Für Temperaturen über 300° verwendete er eine bis zur Rotglut erhitzte Kupferkugel, deren Temperatur dadurch bestimmt wurde, daß man sie unmittelbar nach Ablesung am Galvanometer in ein Kalorimeter fallen ließ und dann aus der Temperaturerhöhung des Wassers die Temperatur der Kugel berechnete.

Die Rosettische Formel hat sich nicht in weiterem Maße eingeführt; sie besitzt einen Nachteil gegenüber den später zu besprechenden Gesetzen von Stefan und Weber, der sie unwahrscheinlich macht, und auf den Wüllner[4]) hinweist. „Nach der Natur des Strahlungsvorganges beobachten wir stets nur die Differenz der beiden Strahlungen des Warmen gegen das Kalte und des Kalten gegen das Warme; die Strahlung jedes dieser beiden Körper

---

[1]) Eine Besprechung des Kirchhoffschen Gesetzes findet sich auf Seite 13 dieser Abhandlung.

[2]) Rosetti, Ann. de chim. et de phys., 5. Serie, 17, 1879.

[3]) Leslie, Nature and properties of heat. 1804.

[4]) Wüllner, Lehrbuch der Physik, Bd. 3, 362; 1885.

kann nur von der Natur des strahlenden, nicht von der des bestrahlten Körpers abhängig sein. Die beobachtete Strahlung muß daher durch die Differenz zweier Ausdrücke dargestellt werden, deren einer nur von der Temperatur des strahlenden und deren anderer nur von der Temperatur des bestrahlten Körpers abhängig ist. Das ist bei der Rosettischen Gleichung nicht der Fall; denn schreiben wir dieselbe als eine Differerenz zweier Glieder, so ist

$$(a\,T^3 + b\,T_1) - (a\,T^2\,T_1 - b\,T_1).$$

Sie stellt somit nicht die Differenz zweier Strahlungen dar. Wir werden deshalb das Rosettische Gesetz nicht weiter zu beachten haben oder als eine Interpolationsformel ansehen müssen, welche nur innerhalb der Grenzen gilt, innerhalb deren sie geprüft worden ist."

Ziemlich gleichzeitig mit Rosetti hat Stefan[1]) im Jahre 1879 die Versuche von Dulong-Petit einer eingehenden Prüfung unterzogen und nachgewiesen, daß sie von den beiden Forschern berechneten Abkühlungsgeschwindigkeiten kein sicheres Maß für die Wärmestrahlung liefern. Er leitet aus den Versuchen von Tyndall,[2]) von Draper,[3]) besonders aber von De la Provostaye und Desains,[4]) sowie Dulong-Petit folgendes Gesetz ab:

$$S = A\,(T^4 - T_0^4).$$

Hierin ist: S die von einem Körper ausgestrahlte Wärme, T die absolute Temperatur dieses strahlenden Körpers, T_0 die absolute Temperatur seiner Umgebung und A eine von der Beschaffenheit des strahlenden Körpers abhängige Emissionskonstante. Boltzmann[5]) hat theoretisch die Richtigkeit der Stefanschen Formel für den absolut schwarzen Körper nachgewiesen. Er benützt hiezu den Maxwellschen Fundamentalsatz der elektromagnetischen Lichttheorie, wonach ein Strahl von strahlender Wärme bei senkrechter Inzidenz auf die Flächeneinheit eines absolut schwarzen Körpers einen Druck ausüben muß, welcher gleich ist der in der Volumeneinheit des durchstrahlten Raumes infolge der Lichtbewegung erzeugten Energie, und stützt sich auf die Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie für den Vorgang bei der Strahlung. Die Anwendbarkeit des Stefanschen Gesetzes wurde dann an verschiedenen Körpern, meistens Platin, untersucht, unter anderen von Schneebeli,[6]) Grätz,[7]) Schleiermacher,[8]) Bottomley[9]) mit dem Erfolge, daß das Gesetz sich für nicht schwarze Körper meist nicht bestätigt zeigte, unter bestimmten Bedingungen aber auch für diese Geltung fand.

[1]) Stefan, Wiener Berichte, Bd. 79, II, 391—428, 1879.
[2]) Tyndall, Pogg. Ann. **124**, 36, 1865.
[3]) Draper, Philosophical Magazine **30**, III. Serie, 1847.
[4]) De la Provostaye und Desains, Ann. chim. et phys. **12**, 1844.
[5]) Boltzmann, Wied. Ann. **22**, 292, 1884.
[6]) Schneebeli, Ann. d. Phys. u. Chemie, Bd. **22**, 430, 1884.
[7]) Grätz, Wied. Ann. **11**, 1880; **36**, 1889.
[8]) Schleiermacher, Wied. Ann. **26**, 287, 1885.
[9]) Bottomley, Phil. Trans. of the R. Soc. London, **178 A**, 429, 1887.

Lummer und Pringsheim[1]) zeigten als erste durch ihre an gleich temperierten Hohlkugeln angestellten Messungen, daß tatsächlich die gesamte Energie der Strahlung eines absolut schwarzen Körpers innerhalb der weiten Grenzen von 290°, absolut, und 1535°, absolut, proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperaturen voranschreitet.

Für die Strahlung des reinen Platins fanden Lummer und Kurlbaum,[2]) daß sie ungefähr proportional sei der fünften Potenz seiner absoluten Temperatur, und Paschen[3]) fand sogar den Exponenten 5,425, während Goldhammer[4]) bewies, daß die Proportionalität der Platinstrahlung mit der fünften Potenz seiner absoluten Temperatur kein Gesetz, sondern bloß eine empirische Formel sei. Lummer[5]) hat darauf hingewiesen, daß Stoffe wie Eisenoxyd, Kohle u. s. w. eine zwischen 4 und 5 liegende Potenz befolgen. Gruner[6]) gibt in einem Beitrag zum Stefanschen Strahlungsgesetz an, daß er auch für nicht-schwarze Oberflächen (blankes Kupfer, Ruß, Firnis etc.) im Temperaturbereich von 0 bis 90° dieses Gesetz sehr wohl brauchbar fand. Compan[7]) stellte dagegen bei seinen Versuchen an einer geschwärzten Kupferkugel, die an den Drähten eines in sie eingelassenen Thermoelements in einer Glaskugel von konstanter Oberflächentemperatur aufgehängt war, fest, daß die zwischen + 302,4° C. und — 182° C. gemessenen Zahlen gute Übereinstimmung mit dem Stefanschen Gesetz zeigen, wobei allerdings dasselbe zwischen 150 und 300° C. zu große Abkühlungsgeschwindigkeiten liefert.

Paschen[8]) hat im Stefanschen Strahlungsgesetz die Exponenten als individuell für die verschiedenen Substanzen betrachtet und folgendes Strahlungsgesetz aufgestellt:

$$E = c \cdot T^{\alpha},$$

worin für blankes Platin $\alpha = 5{,}42$, für Eisenoxyd 4,61, Kupferoxyd 4,56, Ruß 4,52, den schwarzen Körper nach Lummer und Pringsheim 4,0 zu setzen ist. In neuester Zeit gibt dann Siegel[9]) nach dem Vorgang von Paschen,[10]) der auf Grund seiner umfangreichen Versuche, wie oben erwähnt, $S = c \cdot T^{\varepsilon}$ setzt, für verschiedene Gesteine etc., deren Strahlung er mit der Thermosäule bestimmt hat, u. a. folgende Werte an:

Basalt:	c in $\frac{\text{gr cal}}{\text{cm}^2 \text{ sec}}$	$= 0{,}557 \cdot 10^{-12}$	· Exponent ε	$= 4{,}089$
Humus:	„ „ „	$= 0{,}457 \cdot$	„ · „	„ $= 4{,}110$
Wasser:	„ „ „	$= 0{,}496 \cdot$	„ · „	„ $= 4{,}101$
Eis:	„ „ „	$= 0{,}457 \cdot$	„ · „	„ $= 4{,}120.$

[1]) Lummer und Pringsheim, Wied. Ann. **63**, 395, 1897; Drud. Ann. **3**, 159, 1900.
[2]) Lummer und Kurlbaum, Verhandl. d. Phys. Gesch. **17**, 106, 1898.
[3]) Paschen, Wied. Ann. **58**, 455, 1896.
[4]) Goldhammer, Mitteil. d. Phys.-math. Ges. zu Kasan. 1901.
[5]) Lummer, Verh. d. Phys. Ges., Berl. **17**, 106, 1898 u. Ziele d. Leuchttechnik. Berl. 1903.
[6]) Gruner, Phys. Zeitschr., 4. Jahrg., S. 305, 1903.
[7]) Compan, Compt. rend. **133**, 813/815, 1901.
[8]) Paschen, Wied. Ann. **60**, 662, 1901.
[9]) Siegel, Wiener Berichte **116**, S. 1203, 1908.
[10]) Paschen, Wied. Ann. **60**, 662, 1901.

Wenn auch die Versuchsresultate von Paschen und Lummer mancherlei Differenzen zeigen, so lassen sie doch erkennen, innerhalb welcher Grenzen das Strahlungsvermögen nicht-schwarzer, undurchsichtiger Stoffe liegen kann. Das blanke Platin dürfen wir als den Typus eines Minimalstrahlers[1]) ansehen; daß blanke Metalle Minimalstrahler sind, geht schon aus den Messungen von Leslie[2]) hervor, welcher bei 100° C. folgende Verhältnisse für das Strahlungsvermögen fand:

Ruß 100, Glas 90, Glimmer 70, Quecksilber 20,
Papier 98, Mennige 70, Graphit 75, Silber 12.

Nach ihm stellte Melloni[3]) bei 100° C. mit Hilfe der Thermosäule folgende Relativwerte fest:

Ruß 100, Bleiweiß 100, Tusche 85, Metalle 12;

dann fanden De la Provostaye und Desains[4]) bei 100° C. für blanke Metalle Werte zwischen 9 (für Platin) und 2 (für Silber), wenn man die Strahlung für Ruß gleich 100 setzt.

Wiedeburg[5]) verglich mit Hilfe des Leslieschen Würfels 18 Metalle und Legierungen durch eine Thermosäule mit Galvanometer und benützte als Bezugskörper eine gut polierte Silberplatte, die von allen untersuchten Stoffen die kleinste Strahlung aufwies. Seine Versuche ergaben, daß die Metalle sich in reinem, festem Zustand nach wachsendem Strahlungsvermögen in dieselbe Reihenfolge ordnen wie nach wachsendem elektrischen und thermischen Leitungswiderstand, daß jedoch bei den Legierungen und bei Nickel ein derartiger sicherer Schluß nicht gestattet ist.

Hagen und Rubens[6]) haben sich mit der Absorptionsfähigkeit für Strahlen großer Wellenlänge beschäftigt und eine Anwendung der elektromagnetischen Lichttheorie auf die Metalle unternommen. Aus ihrem Versuchsergebnissen ließ sich folgern: „Das Emissionsvermögen der Metalle für lange Wellen ist umgekehrt proportional der Qradratwurzel aus ihrem elektrischen Leitvermögen."

Aber nicht nur Material und Oberflächenbeschaffenheit sind von Einfluß auf das Emissionsvermögen sondern auch die Schichtdicke des strahlenden Körpers; denn an der Strahlung beteiligen sich nicht nur die an der Oberfläche gelegenen Teilchen sondern auch die darunter liegenden bis zu einer gewissen Tiefe. Mit diesem Thema haben sich die Arbeiten von Melloni[7]) bei Lackschichten am Leslieschen Würfel, in neuerer Zeit Villari[8]) an

[1]) Vgl. Schaum, Photochemie und Photographie. Leipzig (Barth) 1908, S. 36.
[2]) Leslie, l. c.
[3]) Melloni, Pogg. Ann. **70**, 205, 327; **71**, 1, 1847.
[4]) De la Provostaye und Desains, Compt. rend. **22**, 825, 1139; **34**, 951, 1852.
[5]) Wiedeburg, Wied. Ann. **66**, 92, 1898.
[6]) Hagen und Rubens, Verhandl. d. Deutschen Phys. Ges. **5**, 113, 1903; Berl. Ber 410, 1903; Drud. Ann. **11**, 1903.
[7]) Melloni, l. c.
[8]) Villari, Nuovo Cimento (3) 3, 5, 1878; Phys. Zeitschr. **2**, 87, 1902.

Steinsalz, Tusche und Ruß und Kurlbaum,[1]) auch Angström[2]) und Crova[3]) befaßt.

Neben dem Stefanschen Strahlungsgesetz bestehen noch einige andere Formeln, die kurze Erwähnung finden mögen. Zunächst hat Weber[4]) ein Gesetz von der Form

$$S_{TT_1} = C \cdot F \cdot e^{a T_1} \cdot \left(\frac{T_1}{T} \cdot e^{a(T - T_1)} - 1 \right)$$

aufgestellt und dessen Richtigkeit an den Versuchen von Schleiermacher,[5]) Bottomley[6]) und Violle[7]) nachgeprüft. Grätz[8]) weist jedoch nach, daß die von Weber gegebene Lösung nicht in genügender Weise den vorhandenen Beobachtungen entspricht und daß für die Gesamtstrahlung das Stefansche Gesetz vorzuziehen ist. Im Gegensatz dazu findet Compan[9]) bei seinen Versuchen mit geschwärzter Kupferkugel die Formel von Weber zwischen 100 und 302° C. in Übereinstimmung mit seinen Beobachtungen, sie versagt jedoch bei tiefen Temperaturen und Stevens[10]) konstatiert bei einer experimentellen Prüfung der Formeln von Dulong-Petit, Rosetti und Weber über die Gesamtstrahlung mittelst einer 14 mm dicken Eisenscheibe von 73 mm Radius gegen eine Thermosäule, daß Webers Formel sich am besten bewährt.

Weitere Formeln sind noch vorgeschlagen worden von

Ferrel:[11]) $q = \sigma (T^n - \Theta^n)$, wo $n < 4{,}2 > 3{,}6$

Edler:[12]) $q = A \cdot (T - \Theta) \cdot e^{a(T - \Theta)}$

Tereschin:[13]) $q = A \cdot e^{aT} \cdot (T^4 - \Theta^4)$

und $q = B \cdot e^{aT^2} \cdot (T^4 - \Theta^4)$

und endlich eine kompliziertere von Violle.[14])

Damit sind nun die wesentlichsten Gesetze über die Gesamtstrahlung und ihre Abhängigkeit von der Temperatur erschöpft. Zusammenfassend sei bemerkt, daß von allen angeführten Formeln das Stefansche Strahlungsgesetz die weitgehenste Anwendung gefunden hat. Auf Grund dessen wurde auch bei der Auswertung der im nachfolgenden behandelten Versuche des

---

[1]) Kurlbaum, Wied. Ann. **67**, 846, 1889.
[2]) Angström, Wied. Ann. **36**, 715, 1899.
[3]) Crova, Compt. rend. **126**, 707, 1898.
[4]) Weber, Berl. Ber. **37**, S. 933, 1888.
[5]) Schleiermacher, Wied. Ann. **26**, 287, 885.
[6]) Bottomley, Phil. Trans. of the R. Soc. London S. 408, 1887.
[7]) Violle, Compt. rend. **15**, 163, 1887.
[8]) Grätz, Wied. Ann. **36**, 857, 1889.
[9]) Compan, l. c.
[10]) W. Le Conte Stevens, Sill. Journ. **44**, 431, 1892.
[11]) Ferrel, Sill. Journ. (3) **38**, 1889; **39**, 132, 1890.
[12]) Edler, Wied. Ann. **40**, 531, 1890.
[13]) Tereschin, Zur Frage der Abhängigkeit der Strahlung von der Temperatur. St. Petersburg 1898. Iswestija d. St. Petersb. Techn. Inst. 1893, S. 253; 1897, S. 1.
[14]) Violle, Compt. rend. **105**, 163, 1887.

Verfassers in erster Linie festgestellt, inwieweit und mit welcher Annäherung das Stefansche Gesetz sich für nicht-schwarze Körper anwenden läßt bzw. welche Änderungen es bei einzelnen Stoffen erfahren muß.[1]) Da alle bisherigen Methoden zur Bestimmung der Strahlungskoeffizienten mehr physikalischen und weniger technischen Verhältnissen Rechnung trugen, und da außerdem neben Péclets Strahlungskoeffizienten speziell für die in der Heizungstechnik vorkommenden Materialien Koeffizienten nur in sehr beschränktem Maße vorliegen, so wurden diese Konstanten auf Grund einer neuen einfachen Versuchsanordnung festgelegt, deren theoretische Grundlagen im nachfolgenden entwickelt seien.

B. Versuche des Verfassers.

a) Theorie der Versuchsanordnung.

Es sei angenommen,[2]) zwei Körper I und II tauschen gegenseitig Wärme aus durch Strahlung und stehen sich so gegenüber, daß sie sich beide parallele Grenzebenen von der Flächeneinheit zuwenden; die abgewendeten Flächen der Körper seien durch Spiegel bedeckt, welche alle von anderer Seite auftreffenden Strahlen zurückwerfen.

Das Emissionsvermögen sei E_1 bzw. E_2 und das Absorptionsvermögen A_1 bzw. A_2. Die Temperaturen seien T_1 und T_2 (absolut) die Strahlungskoeffizienten für die Flächeneinheit σ_1 und σ_2. Dann ist die von der Flächeneinheit des Körpers I in der Zeiteinheit ausgestrahlte Wärme unter der Annahme, daß für ihn (ebenso wie auch für den Körper II) das Stefansche Gesetz gilt

$$1) \qquad Q_1 = \sigma_1 T_1^4 = E_1,$$

wovon $E_1 \cdot A_2$ durch Körper II absorbiert und $E_1 \cdot (1 - A_2)$ nach Körper I zurückgesendet werden. Letzterer nimmt dann $E_1 \cdot (1 - A_2) \cdot A_1$ auf und sendet $E_1 (1 - A_2) (1 - A_1)$ wieder nach II zurück. Von II kommt wieder

$$E_1 (1 - A_2) (1 - A_1) (1 - A_2)$$

nach Körper I zurück, der dann

$$E_1 (1 - A_2) \cdot A_1 (1 - A_1) (1 - A_2)$$

aufnimmt. Setzt man diese Betrachtung fort und bezeichnet den Faktor $(1 - A_1) \cdot (1 - A_2)$ mit q, dann zeigt sich, daß der vom Körper I im Beharrungszustand von der eigenen Strahlung absorbierte Betrag Q_1' den Wert hat:

$$Q_1' = E_1 \cdot (1 - A_2) \cdot A_1 \cdot [1 + q + q^2 + q^3 + \cdots].$$

[1]) Der von Ch. Eberle (Z. d. V. D. I. 1908, S. 481) aus seinen umfassenden Versuchen gezogene Schluß auf die Gültigkeit des Stefanschen Gesetzes ist im II. Teil besprochen.

[2]) E. Mach, Wärmelehre, 1900, S. 141. W. Nusselt, Diss., München 1908, S. 79.

Da nun $q < 1$ ist, so ist

$$1 + q + q^2 + q^3 + \cdots = \frac{1}{1 - q}$$

und es folgt daher:

2) $$Q_1' = \frac{E \cdot (1 - A_2) \cdot A_1}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)}.$$

Bedeutet nun e_1 und e_2 das Emissionsvermögen des absolut schwarzen Körpers für die Temperaturen T_1 und T_2, ferner σ seine Strahlungskonstante, so ist nach dem Kirchhoffschen Satz,[1]) welcher aussagt: „Das Verhältnis der kalorischen Emission zur kalorischen Absorption ist eine für alle Körper gleiche Funktion von λ, der Wellenlänge, und T, absoluten Temperatur, und zwar gleich der kalorischen Emission des absolut schwarzen Körpers“:

3) $$\begin{cases} E_1 = A_1 \cdot e_1 = A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 = \sigma_1 \cdot T_1^4 \\ E_2 = A_2 \cdot e_2 = A_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 = \sigma_2 \cdot T_2^4. \end{cases}$$

Setzt man die für E_1, E_2, A_1 und A_2 erhaltenen Werte in Formel 2) ein, dann ergibt sich

2 a) $$Q_1' = \frac{\sigma_1 \cdot T_1^4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma}\right) \frac{\sigma_1}{\sigma}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma}\right)\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma}\right)}.$$

Die entprechenden Betrachtungen sind nun für den Körper II anzustellen. Er strahlt in der Zeiteinheit die Wärmemenge aus: $Q_2 = \sigma_2 T_2^4 = E_2$, wovon I den Betrag $E_2 \cdot A_1$ absorbiert und $E_2 \cdot (1 - A_1)$ an II zurücksendet, welch letzterer $E_2 (1 - A_1) \cdot A_2$ aufnimmt, $E_2 (1 - A_1)(1 - A_2)$ an I zurücksendet, wovon dieser $E_2 (1 - A_1)(1 - A_2) \cdot A_1$ behält u. s. f.

Im stationären Zustand erhält dann I im ganzen von der von II ausgehenden Strahlung

4) $$Q_1'' = E_2 \cdot A_1 \cdot (1 + q + q^2 + q^3 + \cdots) = \frac{E_2 \cdot A_1}{1 - q} = \frac{E_2 \cdot A_1}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)}$$

oder durch Benützung von Formel 3)

4 a) $$Q_1'' = \frac{\sigma_2 \cdot T_2^4 \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma}\right)\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma}\right)},$$

das ist also die durch I absorbierte Wärme der Emission von II. Dann ist die gesamte ausgetauschte Wärme:

5) $$Q = Q_1 - Q_1' - Q_1'' = \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma}}.$$

Wenn nun im Gegensatz zu dem hier geschilderten Beispiel der Fall eintritt, daß ein Körper I von einem Körper II, als einer größeren, ge-

[1]) Vgl. z. B. O. D. Chwolson, Lehrbuch der Physik, Bd. 2, S. 205, 1907.

schlossenen Hülle umgeben ist und beide wieder durch Strahlung Wärme austauschen, dann ist unter der Annahme, daß beide Oberflächen absolut schwarz sind, und Körper I keine einspringenden Ecken hat, die von I ausgestrahlte Wärme (nach Stefan), wenn F_1 seine Oberfläche:

$$6) \qquad Q_1 = \sigma \, . \, T_1^4 \cdot F_1 .$$

Von der vom Körper II ausgestrahlten Wärme trifft nur ein Teil, nämlich

$$Q_1'' = \sigma \cdot T_2^4 \cdot \varphi_2 \cdot F_2$$

den Körper I und wird dort vollkommen absorbiert.

φ_2 ist von Mollier[1]) als Winkelverhältnis bezeichnet worden, auf Grund folgender Überlegung: Das Element einer ebenen Körperoberfläche sendet nach allen Richtungen Strahlen aus, die also durch eine Halbkugel begrenzt werden; von diesen Strahlen trifft aber im allgemeinen nur ein Teil, ein bestimmter Kegel, den anderen Körper, und das Verhältnis dieses Kegels zu der Halbkugel nennt Mollier das Winkelverhältnis φ.

Das Produkt aus der Körperoberfläche F multipliziert mit dem für die sämtlichen Oberflächenelemente eines Körpers jeweils feststellbaren Mittelwert des Winkelverhältnisses φ gibt dann die Gesamtzahl der von diesem Körper dem zweiten zugesandten Strahlen.

Führen wir nun noch das Winkelverhältnis φ_1 des Körpers I gegenüber dem Körper II ein, so muß offenbar sein:

$$\varphi_1 \cdot F_1 = \varphi_2 \cdot F_2 ,$$

wobei immer die kleinere Fläche das größere Winkelverhältnis hat. Da im vorliegenden Fall alle vom Körper I ausgehenden Strahlen den Körper II treffen, muß hier $\varphi_1 = 1$, also $F_1 = \varphi_2 \cdot F_2$ sein und die von Körper I auf Körper II übergegangene Wärme ist dann

$$9) \qquad Q = Q_1 - Q_1'' = \sigma \cdot F_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4),$$

d. h. die abgegebene Wärme ist hier unabhängig von der Größe und vom Abstand der Umhüllung. Dies Resultat gilt natürlich auch dann, wenn die beiden Flächen verschiedene Strahlungsvermögen haben, da F_1 nur von der Form der strahlenden Körper, nicht von deren Material abhängig sein kann. Setzt man nun noch, da σ sehr klein ist,

$$C = 10^8 \cdot \sigma, \quad C_1 = 10^8 \cdot \sigma_1, \quad C_2 = 10^8 \cdot \sigma_2,$$

so liefern die Formeln 5) und 9) die folgende Gleichung für die von einem Körper I mit den Konstanten F_1, T_1, C_1 an den Körper II mit den Konstanten F_2, T_2, C_2 abgegebene Wärmemenge:[2])

---

[1]) Mollier, Wärmedurchgang durch Heizflächen. Zeitschr. d. V. D. I., Bd. 40, S. 161, 1897.

[2]) S. Nusselt, Diss., l. c.

10) $$S = \frac{F_1 \cdot \left\{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right\}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}}.$$

Hierin mag C als die Strahlungskonstante des absolut schwarzen Körpers bezeichnet werden. Da nach Kurlbaum[1])

$$\sigma = 1{,}28 \cdot 10^{-12} \text{ gr cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} (^0C)^{-4},$$

so folgt, ins technische Maßsystem umgerechnet:

$$C = 4{,}61 \cdot \text{W. E. m}^{-2} \text{ st}^{-1} (^0C)^{-4}.$$

Wählt man nun bei einem ersten Versuch für Körper I und Körper II das gleiche Material, so kann man aus der ausgestrahlten Wärmemenge Q leicht die Strahlungskonstante C_2 der Hülle berechnen und dann bei Veränderung des Materials des Körpers I aus Gleichung 10) für alle anderen Stoffe die Strahlungskonstante C_1 bestimmen, sowie durch deren Veränderlichkeit bzw. Konstanz die Proportionalität der Strahlung mit der vierten Potenz der Temperatur nachprüfen.

Befolgt nun aber der strahlende Körper I nicht das Stefansche Strahlungsgesetz, sondern zeigt sich, daß seine Gesamtstrahlung besser durch die Gleichung

$$Q_1 = \sigma_1 \cdot T_1^{\varepsilon} = E_1$$

ausgedrückt wird, so ist die zur Bestimmung von σ_1 und ε führende Gleichung aufzustellen. Dann ist die von I absorbierte Wärme der Eigenstrahlung (bezogen auf die Flächeneinheit):

$$Q_1' = \frac{E_1 (1 - A_2) \cdot A_1}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)} = \frac{\sigma \cdot T_1^{\varepsilon} \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma}\right) \frac{\sigma_1}{\sigma} \cdot \frac{T_1^{\varepsilon}}{T_1^4}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma} \cdot \frac{T_1^{\varepsilon}}{T^4}\right)\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma}\right)},$$

ferner die von I absorbierte Wärme der Emission von II

$$Q_1'' = \frac{E_2 \cdot A_1}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)} = \frac{\sigma_2 \cdot T_2^4 \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma} \cdot \frac{T_1^{\varepsilon}}{T_1^4}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma} \cdot \frac{T_1^{\varepsilon}}{T_1^4}\right)\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma}\right)}$$

und endlich die gesamte ausgetauschte Wärme

$$Q = Q_1 - Q_1' - Q_1'' = \frac{E_1 \cdot A_2 - E_2 \cdot A_1}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)} = \frac{\sigma_1 \cdot T_1^{\varepsilon} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma} - \sigma_2 T_2^4 \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma} \cdot \frac{T_1^{\varepsilon}}{T^4}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma} \cdot \frac{T_1^{\varepsilon}}{T_1^4}\right)\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma}\right)}.$$

---

[1]) Kurlbaum, Wied. Ann. **65**, 746, 1898.

Führt man auch hier noch C_1, C_2 und C ein und bezeichnet mit F die Oberfläche dieses Körpers, so ist

$$S = F \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^{\varepsilon} - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \cdot \frac{T_1^{\varepsilon}}{T_1^4}}{\frac{1}{C_1} + \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}\right)\frac{T_1^{\varepsilon}}{T_1^4}}.$$

Nach dieser Formel berechnet sich also die durch Strahlung ausgetauschte Gesamtwärme, wenn der strahlende Körper I dem Stefanschen Gesetz nicht folgt und wenn vorausgesetzt wird, daß die umgebende Hülle II das Gesetz $E_2 = \sigma_2 \cdot T_2^4$ befriedigt, also ein schwarzer Körper ist. Auch hier läßt sich dann, wenn Q, F, T_1, T_2, C_2 und C bekannt bzw. experimentell gefunden sind, mittelst der Bedingung $C_1 =$ constans dieser Faktor C_1 und der Exponent ε rechnerisch ermitteln.

b) Beschreibung der Versuchseinrichtung.

Die experimentelle Anordnung war so gestaltet, daß der strahlende Körper Kugelform besaß, und in seinem Innern einen elektrischen Heizkörper trug, aus dessen Wattleistung sich die zugeführte Wärme feststellen ließ. Umgeben war diese aus dem jeweils zu untersuchenden Material hergestellte Kugel von einer ebenfalls kugelförmigen, innen geschwärzten Hülle aus Messing, die zwecks Erzielung konstanter Oberflächentemperatur in ein Kältebad aus schmelzendem Eis tauchte. Die Oberflächentemperatur auf den beiden Kugeln wurde durch Thermoelemente gemessen.

Wird nun die innere Kugel durch elektrische Heizung erwärmt, so gibt sie ihre Wärme teils durch Strahlung, teils durch Leitung, teils durch Konvektion ab (s. S. 1). Pumpt man jedoch die Luft zwischen den beiden Kugeln bis zu einem gewissen Grade aus, so beseitigt man den Wärmeverlust durch Konvektion.[1]) Da der auf die Leitung entfallende Anteil des Wärmeverlustes mit Hilfe der bekannten Wärmeleitungszahl der Luft berechnet werden kann, so ergibt sich also die Möglichkeit, das Gesetz der Wärmestrahlung aus dem Betrage der elektrischen Heizung und den Temperaturen der inneren und äußeren Kugel festzustellen.

Einen Überblick über die Versuchseinrichtung bietet Fig. 1, wo im Vordergrund die zum Evakuieren benützte Luftpumpe und das zur Messung des Luftdrucks verwendete Manometer vor einem mit Isoliermaterial gegen Wärmeverlust geschützten Holzkasten zu sehen sind, der in seinem Innern die eigentlichen Versuchskörper aufnahm und in Fig. 2 im Schnitt dargestellt ist.

1. Der strahlende Körper.

Es kamen Kugeln aus Messing, Schmiedeisen, Kupfer und Zink mit einem äußeren Durchmesser von 101 mm und einer Wandstärke von 1 mm, ferner eine Gußeisenkugel von 113,5 mm äußerem Durchmesser bei 8 mm

[1]) Kundt und Warburg, Pogg. Ann. **156**, 177, 1875.

Wandstärke und eine Kugel aus Kalkmörtel von ca. 110 mm äußerem Durchmesser bestehend aus einer ca. 15 mm dicken Schicht, die direkt auf den Heizkörper aufgetragen war, zur Verwendung. Größere Durchmesser als die angegebenen zu wählen, erschien nicht zweckmäßig, da auf diesen inneren Kugeln eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperatur erreicht werden sollte, was mit zunehmendem Durchmesser aber bedeutend erschwert wird; überdies wächst die zur Erzeugung einer bestimmten Temperatur nötige Heizung bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen angenähert mit dem Durchmesser. Mit zunehmender Heizleistung wäre daher die konstruktive Ausbildung des in der Kugel untergebrachten Heizkörpers erschwert worden. Eine Verkleinerung des Kugeldurchmessers hätte Schwierigkeiten in der Ausführung des Heizkörpers gebracht.

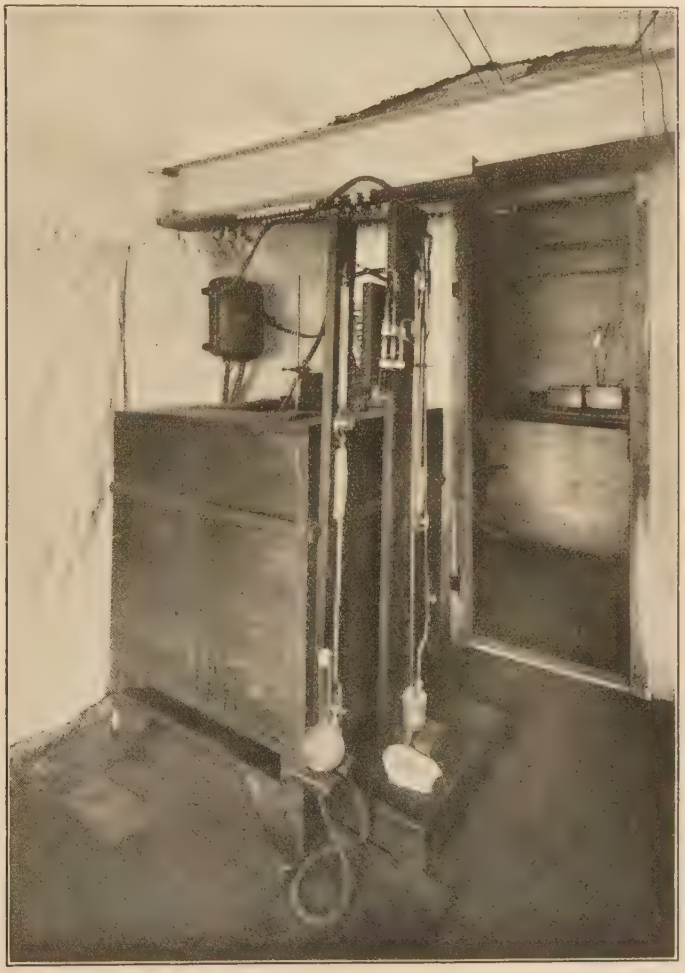


Fig. 1.

Die Metallkugeln bestanden aus zwei gleich großen Halbkugeln, die mit einem hart aufgelöteten bzw. angedrehten Gewinde versehen waren, wodurch eine glatte Verbindung der beiden Hälften ermöglicht wurde. Bei der Zinkkugel trat an die Stelle des Gewindes ein Bajonettverschluß. An ihrem höchsten Punkte waren die Kugeln mit einem Stahlhaken versehen, der durch einen äußerst dünnen Stahldraht die Verbindung mit einer an der äußeren Messinghülle angebrachten Öse herstellte. Die Oberflächentemperatur wurde mittelst eines Thermoelements auf später näher zu besprechende Art im untersten Punkt der Kugel gemessen. Diese inneren Kugeln wurden nicht luftdicht abgeschlossen, sondern gleichfalls mit evakuiert.

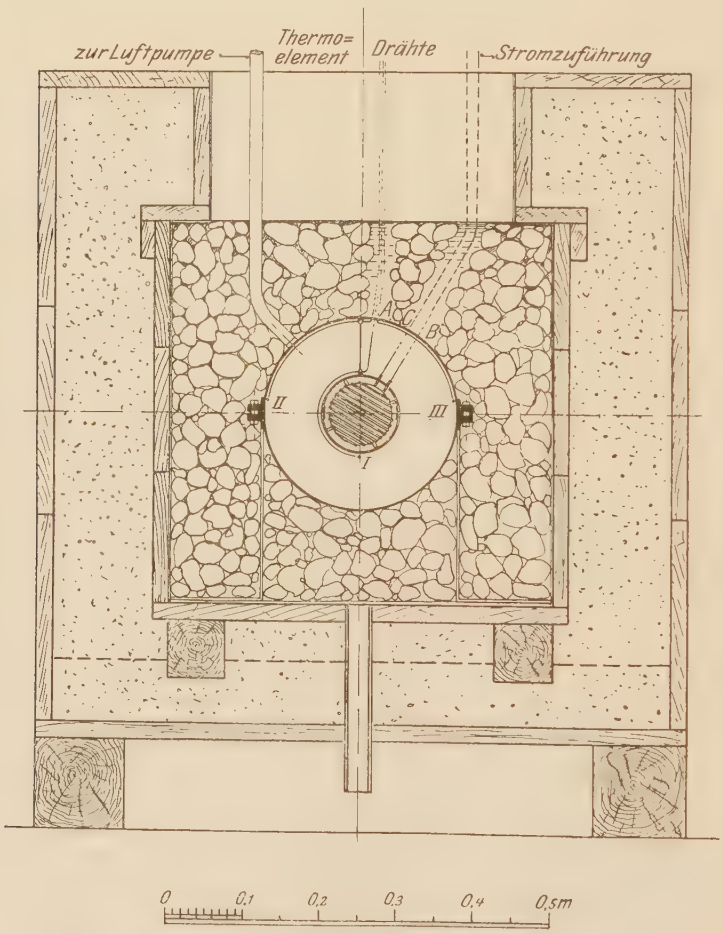


Fig. 2.

Versuchsanordnung zu den Versuchen über Strahlung.

2. Die umgebende Hülle.

Dieselbe bestand aus einer innen mit Terpentinlampenruß geschwärzten, außen mit weißem Emaillack gestrichenen Messingkugel von 250 mm Innendurchmesser und 1,2 mm Wandstärke (s. Fig. 2). Auf diese Weise entstand zwischen der inneren und äußeren Kugel eine Luftschicht von im allgemeinen 75 mm Dicke, die durch eine Sprengelpumpe mit vorgeschalteter Wasserstrahlpumpe (sog. Münchener Wasserstrahlpumpe nach Dr. Henning) auf einen möglichst geringen Druck gebracht und fortwährend gehalten wurde. Zur Druckmessung diente ein Vakuummeter nach Mac Leod. Zwischen Rezipient und Hochvakuumpumpe war ein Gefäß mit Phosphorpentoxyd eingeschaltet, das die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit aufzunehmen hatte. Die äußere Messingkugel war nach einem größten Kreis geschnitten und mit 7,5 mm starken Messing-Winkelflanschen versehen. Zwischen diese Flaschen wurde ein 5 mm breiter und 2 mm dicker Ring aus grauem Paragummi von 250 mm Lichtdurchmesser eingelegt und dann die beiden Flanschen durch 8 Kopfschrauben aus Messing verbunden.

Die Oberflächentemperatur der Messingkugel wurde durch zwei Thermoelemente bestimmt, deren Lötstellen an die Innenflächen der Kugel mittelst kleiner Messingplättchen angedrückt wurden. Da die beiden Plättchen durch 2,3 mm starke Messingschrauben festgehalten wurden, die ihrerseits durch die 1,2 mm starke Messingwand drangen, entstanden vier Dichtungsstellen, die mittelst eines aus Wachs, Guttapercha und Schellack hergestellten Grundkitts gut geschlossen werden konnten. Die Stromzuführungsdrähte für den Heizkörper wurden durch zwei an der äußeren Messingkugel angelötete Stopfbüchsen (s. Fig. 3) geführt, die sich gut bewährt haben.

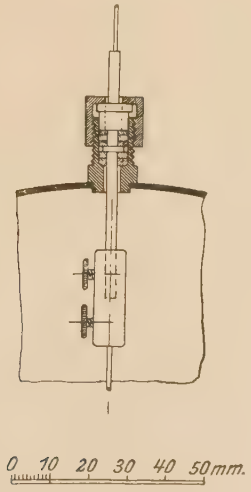


Fig. 3.

Stopfbüchse für die **Stromzuführungsdrähte** (bei Punkt *B* und *C*).

Die von den Kugeloberflächen abzweigenden 3.2 = 6 Thermoelementdrähte (s. S. 21) wurden im Scheitel der äußeren Kugel durchgeführt und dort mittelst zweier auf einem Glasstab angebrachter Vulkanfiberscheiben festgehalten. Als Dichtungsmaterial fand der oben beschriebene Grundkitt Verwendung, welcher den trichterförmigen Ansatz an der Messingkugel ausfüllte (Fig. 4). Es erwies sich dann als notwendig, diesen Kegel mit einem 50 mm hohen und 40 mm weiten Weißblechzylinder zu umgeben, der mit Paraffin ausgegossen wurde. Zum Schutz gegen Nässe und Verrosten waren die Thermoelementdrähte außerhalb der Messingkugel auf ca. 2,5 m mit dünnen Schläuchen, sogenannten Ventilschläuchen, umhüllt. An der oberen Messinghalbkugel war noch ein Messingrohr angelötet, das den Schlauchansatz für den zur Pumpe führenden Druckschlauch darstellte.

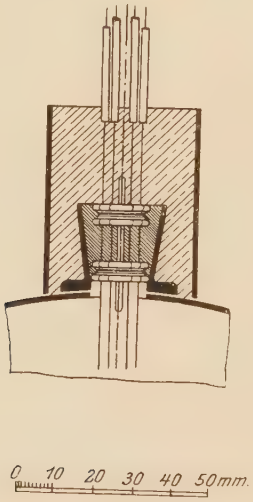


Fig. 4.

Dichtungskegel für die **Thermoelementdrähte** (bei Punkt *A*).

Es wurde möglichst darauf gesehen, Schlauchverbindungen zu vermeiden; dort wo sie sich nicht umgehen ließen, wurden sogenannte Quecksilberschläuche von 5 mm lichtem Durchmesser und 5 mm Wandstärke verwendet. Es könnte noch die Frage aufgeworfen werden, ob nicht eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Durchmessers der äußeren Kugel angezeigt erschien. Hierauf ist zu erwidern, daß eine Vergrößerung des Durchmessers eine weitere Erschwerung des Dichthaltens herbeigeführt hätte, eine Verkleinerung aber den Einfluß der Wärmeleitung des noch vorhandenen Luftrestes vermehrt und die konstruktive Durchführung erschwert hätte.

Die Messingkugel war an einem vierfüßigen Stativ befestigt und zwecks Erzeugung einer konstanten und gleichmäßigen Oberflächentemperatur mit schmelzendem Eis umgeben. Die Kugel befand sich in einem mit verbleitem Eisenblech ausgeschlagenen und oben mit Füllöffnung versehenen würfel-

förmigen Holzkasten von 50 cm Kantenlänge, der dann wieder durch eine ca. $15^1/_2$ cm bis $17^1/_2$ cm starke Isolierschicht aus Expansitschrot[1]) vor Wärmeverlusten geschützt wurde (s. Fig. 2).

3. Der Heizkörper.

In der inneren Kugel, deren Strahlung untersucht werden sollte, war ein elektrisch gewärmter Heizkörper untergebracht, für den die auf 20, 40, 60 und 120 Volt einstellbare Spannung einer Akkumulatorenbatterie zur Verfügung stand. Der eigentliche Heizkörper bestand aus Widerstandsplätt, d. i. flach gewalztem Nickelindraht von ungefähr 2,1 mm Breite und ca. 2,5 Ohm Widerstand pro laufenden Meter, welcher dann in einer Länge von ungefähr 4 m auf eine Specksteinkugel von 80 mm Durchmesser in Abständen von 5 mm aufgewickelt und durch 1 mm starke und 15 mm lange Flachkopfstifte in seiner Lage festgehalten wurde. Die Heizkugel wurde zur Isolation gegen die Metallkugel mit 5 Glasfüßen aus Jenenser Hartglas versehen. Der Widerstand des Heizdrahts änderte sich zwischen 1 und 9 Ampère nur sehr wenig und betrug im Mittel 9,4 Ohm. Die Stromzuführung erfolgte durch 1 mm starke Kupferdrähte, die auf dem Heizkörper an das Widerstandsplätt angelötet und durch Porzellanröhren beim Durchgang durch die zu untersuchende Metallkugel isoliert und durch Klemmschrauben (s. Fig. 3) mit den Stopfbüchsen an der Messinghülle verbunden waren. Von dort führten die Kupferdrähte, durch Gummischläuche geschützt, zu zwei außerhalb des Kältebads am Holzkasten (s. Fig. 1) angebrachten Klemmen, an denen die Spannung gemessen wurde, so daß also das kurze Stück zwischen Heizkörper und diesen Klemmen für die Spannungsmessung verloren geht, was aber für die Genauigkeit derselben nicht von Einfluß ist.

Zur Messung der Stromstärke und der Spannung diente ein Milli-Volt- und Ampèremeter bzw. ein Präzisions-Voltmeter von der Weston European Elektrical Company, zur Messung der Spannung unter 15 Volt ein Milli-Voltmeter von Siemens & Halske, Berlin. Sämtliche Meßinstrumente waren mit zwei durch Kompensation geeichten Normalinstrumenten verglichen worden. Die Regulierung der zugeführten Wärme erfolgte durch verschiedene, dem Heizkörper vorgeschaltete Widerstände und zwar fanden zur groben Regulierung Glühlampenwiderstände und zur genauen Regulierung auf konstante Heizleistung ein Gleitdrahtwiderstand von Goergen & Co., München Verwendung. Über die Schaltung der elektrischen Heizung ist Näheres aus dem Schaltungsschema auf Fig. 5 ersichtlich.

4. Messung der Oberflächentemperatur.

Die Temperatur an der Oberfläche der inneren, wie der äußeren Kugel wurde durch Thermoelemente aus Kupfer-Konstantan bestimmt und zwar an der inneren Kugeloberfläche durch eine, an der äußeren durch zwei Löt-

[1]) Bezogen von Grünzweig & Hartmann in Ludwigshafen a. Rh.

stellen. Die Drähte hatten eine Stärke von 0,6 mm, führten zu dem ungefähr 5 m entfernten Umschalter *a* (s. Fig. 6) und waren an einem Ende hart gelötet und zwar so, daß eine zylindrische Lötstelle von ca. 1 mm Durchmesser und 2 mm Länge entstand. Alle Drähte waren mit Seide umsponnen und mit Zaponlack gestrichen. Das Element für die Temperaturmessung an der inneren Kugel war auf ca. 120 mm Länge mit Glasperlen isoliert, außerhalb der Messingkugel beim Durchgang durch das Eis mit Gummischläuchen, sogenannten Ventilschläuchen, geschützt. Der Quecksilberumschalter *a* ermöglichte es, den Stromkreis zwischen den drei warmen Lötstellen, der für die drei Elemente gemeinsamen, in Eis befindlichen Lötstelle *c* und dem zur Messung der elektromotorischen Kraft dienenden Milli-Voltmeter (von Siemens & Halske, Berlin) zu schließen bzw. zu unterbrechen. Näheren Aufschluß gibt noch das in Fig. 6 dargestellte Schaltungsschema für die Thermoelemente.

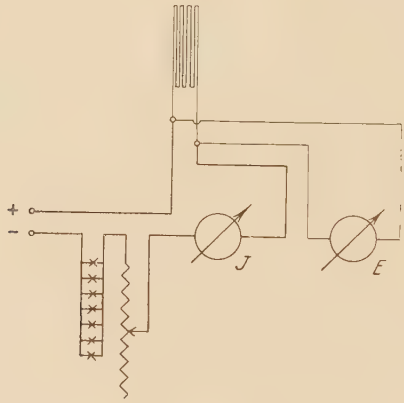


Fig. 5.

Schaltungsschema der elektrischen Heizung.

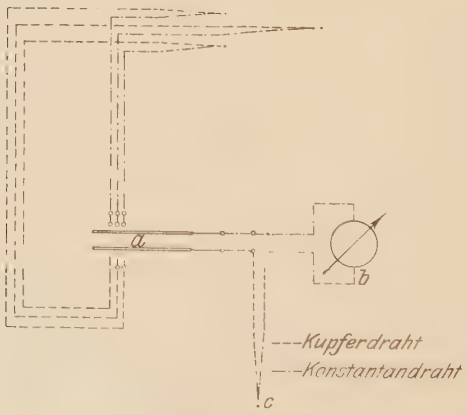


Fig. 6.

Schaltungsschema der Thermoelemente.

Die Vorversuche des Verfassers bestätigen von neuem, daß man bei der Oberflächen-Temperaturmessung durch Thermoelemente mit äußerster Vorsicht arbeiten muß. Wagner[1]) gelangt in einer Abhandlung über die innere und äußere Wärmeleitung zu dem Resultat, daß solche Dispositionen, bei denen nicht absolut eine metallische und gut leitende innige Berührung der Thermoelementlötstelle mit der Körperoberfläche stattfindet, besonders für variable Temperaturmessungen zu verwerfen sind. Nusselt[2]) hat vor allem darauf hingewiesen, daß die Drähte noch einige cm von der Lötstelle ab so geführt werden müssen, daß auf ihnen die gleiche Temperatur herrscht wie an dem Punkte, dessen Temperatur bestimmt werden soll. Nusselt gelangt ferner zu dem Resultate, daß die Temperatur der Oberfläche heißer Metallkörper nur dann genau gemessen werden kann, wenn die Drähte des Thermoelements vorzüglich gegen Wärmeabgabe isoliert sind, und für innige Berührung durch Anlöten gesorgt wird.

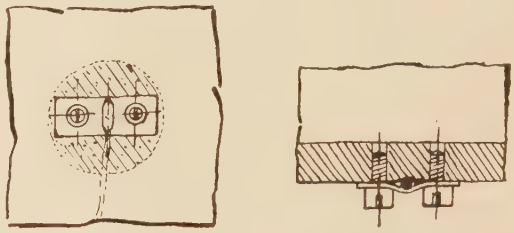
Eberle[3]) benützt zur Messung der Temperatur von Rohroberflächen ebenfalls Thermoelemente und erwähnt, daß dieselben sehr gut anliegen müssen, um richtige Temperaturen anzeigen zu können. Um dies zu erreichen, hat er das Element durch ein genau und metallisch auf die Rohraußenfläche aufgepaßtes Eisenstück, welches auf der Zylinderoberfläche durch einen Eisenring festgehalten war, an die Rohrwand gepreßt. Da dieses Eisenstück bei guter Anpassung die Temperatur der Rohrwandung annimmt, so sollte sonach das Element vollständig in die zu messende Temperatur eingebettet sein. Mit dieser Anordnung sollen sich bei sorgfältiger Ausführung des Anschlusses des Druckstückes sehr zuverlässige Messungen ausführen lassen, während bei bloßem Auflegen des Elements an die Rohrwand bekanntlich erhebliche Fehler entstehen. Diese Fehler sind jedoch wohl auch bei Eberles Versuchen nicht ganz vermieden, da durch die Anhäufung gut leitender Metallmassen um die Thermoelementstelle wohl ein Teil der zu messenden Wärme durch den Metallring verloren geht.

Vom Verfasser wurden nun erneut Versuche über den Einfluß der Anbringsmethode von Thermoelementen auf die Oberflächen-Temperaturmessung unternommen. Ein schmiedeisernes Rohr von 3000 mm Länge und 59 mm äußerem Durchmesser wurde durch einen im Innern angebrachten elektrischen Heizkörper (s. auch Fig. 11) auf Temperatnren von 37° bis 137° C. erhitzt und nach Eintritt des Dauerzustandes die Oberflächentemperatur mit Thermoelementen gemessen. Dann zeigte ein mittelst eines mehrmals herumgeschlungenen Seidenfadens festgebundenes Thermoelement bei 70,8° um 3,3°, bei 94,0° um 4,2° und bei 120,8° um 5,0° zu wenig, und zwar gegenüber dem angelöteten Thermoelement (mit Zinn weich angelötet). Außer der Befestigung durch Anlöten wurde auch noch eine andere Art der Befestigung untersucht. Da nämlich die Versuche über den Schmelzpunkt des Zinns

---

[1]) Wagner, Diss., Zürich 1902.
[2]) Nusselt, Diss., l. c.
[3]) Eberle, Zeitschr. d. V. D. I. 52, 481, 1908.

hinaus sich erstrecken sollten, und ein Anlöten der hartgelöteten Thermoelementstelle mittelst Hart- oder Schnelllot Schwierigkeiten bringt, wurden die Thermoelementlötstellen, wie nebenstehend skizziert, auf der Oberfläche festgehalten. Ein äußerst dünnes Plättchen aus dem Material des jeweils zu untersuchenden Metalls von 5 mm Breite und 10 mm Länge drückt die Lötstelle an die Oberfläche und wird mittelst 2,3 mm starker Schräubchen in seiner Lage festgehalten. Zur Herbeiführung eines innigen Kontakts der Lötstelle mit der Oberfläche wird das Plättchen samt Lötstelle mit einer nicht zu dicken, kreisförmigen Schicht von 10 mm Durchmesser eines aus Wasserglas und Schwerspat bestehenden Kittes umhüllt. Es zeigte sich dann bei diesem angedrückten Thermoelement eine höhere Temperatur als beim angelöteten Thermoelement.



Infolgedessen wurde nun ein Vergleich zwischen diesen beiden Anbringungsmethoden, dem Anlöten und dem Andrücken unternommen, und zwar mittelst eines im Laboratorium vorhandenen, von Dr. Nusselt[1]) zu Strahlungsversuchen verwendeten Apparats. Ein 50 cm langes, schmiedeisernes Rohr von 50 mm äußerem Durchmesser wurde mit Öl gefüllt, das durch einen elektrischen Heizdraht erwärmt wurde. Dieser Draht war auf eine in der Achse des Rohres gelagerte Welle gewickelt, die durch einen Elektromotor gedreht zur Mischung des Öles Flügel trug. Dem Draht wurde elektrische Spannung durch Schleifringe zugeführt. Die beiden zu vergleichenden Thermoelemente wurden in der Mitte des vertikal aufgestellten Rohres an gegenüberliegenden Punkten desselben Durchmessers, also in gleicher Höhe, angebracht. Bei jedem Versuch wurde mit konstanter Energie geheizt und der Beharrungszustand abgewartet. Dabei zeigte nun

1. das mit Deckplättchen angedrückte und mit Bindekitt umgebene Element gegenüber dem angelöteten und mit einem starken Wattebausch umhüllten Element bei 93,4° C. . . . um 0,1—0,4° weniger,
2. das mit Deckplättchen angedrückte Element, mit Bindekitt umgeben, gegenüber dem angelöteten Element, aber ohne Wattebausch, bei 95,3° C. . . . . um 1,8—2,2° mehr,
3. das mit dem Deckplättchen angedrückte Element, aber ohne Bindekitt, gegenüber dem angelöteten Element ohne Wattebausch bei 94,0° C. . . . . um 1,2—1,8° mehr.

[1]) Nusselt, Diss., l. c.

Auf Grund dieses Vergleichs wurde der Anbringungsmethode mit angedrücktem und durch Bindekitt verbundenen Thermoelement der Vorzug gegeben und diese Art der Befestigung bei allen Versuchen des Verfassers zur Oberflächen-Temperaturmessung verwendet.

An der äußeren Kugel kamen Messingplättchen zur Verwendung, für die an der inneren Kugel befestigte Lötstelle Plättchen aus dem jeweils zu untersuchenden Material. Das Thermoelement zur Messung der inneren Kugeltemperatur wurde im untersten Punkt der Kugel gegenüber dem Aufhängehaken (nach Compan)[1]) angebracht. Dadurch wurde es ermöglicht, entsprechend der Begründung durch Nusselt, die Drähte möglichst lang (hier ca. 10 cm) in den zu messenden Temperaturen (hier entlang der Kugeloberfläche) zu führen. In dieser Hinsicht angestellte Vorversuche haben bestätigt, daß die Temperatur zu niedrig gemessen wird, wenn man die Thermoelemente im Äquator oder an einem höher gelegenen Punkt der Kugel anbringt.

Bei Bestimmung der Oberflächentemperatur der Kugel aus Kalkmörtel kommt die von Nusselt geführte Überlegung in Betracht, daß die Messung der Oberflächentemperatur von schlechten Wärmeleitern nur dann genau gelingt, wenn man das Thermoelement in die Iolierschicht einbettet, die Temperatur also in der Isolierschicht mißt und auf die Oberfläche extrapoliert.[2]) Deshalb wurde hier die Lötstelle etwa 8 mm tief im Material eingebettet und auch die Drähte im Mörtel bis zum obersten Punkt der Kugel geführt. Durch Extrapolation konnte dann aus der Leitfähigkeit des Mörtels[3]) die Oberflächentemperatur bestimmt werden.

Die Oberflächentemperatur der äußeren umhüllenden Messingkugel wurde durch zwei Thermoelemente bestimmt, die, wie erwähnt, mit Messingplättchen an der oberen Kugelhälfte nahe am Äquator an gegenüberliegenden Stellen befestigt waren und genügend weit der Kugeloberfläche entlang geführt werden konnten, so daß sie nur minimale Abweichungen voneinander zeigten.

c) Durchführung der Versuche.

1. Eichung der Thermoelemente.

Die drei zur Verwendung kommenden Thermoelemente bestanden aus 0,6 mm starken, mit Seide umsponnenen Kupfer- und Konstantandrähten. Die Thermoelemente für Oberflächen-Temperaturmessung an der äußeren Kugel wurden von 0 bis 50°, das für die Innenkugel von 0 bis 340° in einem Ölthermostaten mit elektrischer Heizung geeicht, ähnlich wie er von Rothe[4])

[1]) Compan, Compt. rend., l. c.

[2]) Nusselt, Diss., l. c.

[3]) Für den Wärmeleitungskoeffizienten von Mörtelmauerwerk (Kalkmörtel) wurde nach einem von Dr. Gröber im hiesigen Laboratorium für technische Physik unternommenen Versuch der Wert gleich 0,68 W. E. m^{-1} (^{0} C.)$^{-1}$ st^{-1} gefunden.

[4]) Rothe, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 19, 40, 1899.

beschrieben ist. Zur Messung der Temperatur des Ölbades wurden von der physikalisch-technischen Reichsanstalt geprüfte Quecksilberthermometer verwendet, die in Fünftelgrad geteilt waren und deren herausragender Faden mit dem Mahlkeschen[1]) Fadenthermometer korrigiert wurde. Die Eichung wurde in Stufen von 15° vorgenommen. Die Lötstellen waren in dünnwandigen Glasröhren untergebracht, deren Boden mit metallisch reinem Kupfer (Pulver) bedeckt war, und die etwa 15 cm tief in das Öl eintauchten. Bei Messung der elektromotorischen Kraft der Thermoelemente für Temperaturen von 0° bis 50° zeigten sich Differenzen zwischen den einzelnen Elementen von nur 1 bis 2 pro Tausend.

Für Temperaturen von 260 bis 380° wurde das innere Thermoelement, wie es kurz genannt sei, in einem Salpeterbad geeicht. Der Salpeter befand sich in einem Porzellangefäß von einem Liter Inhalt, dessen Wände durch Widerstandsplätt elektrisch erwärmt und durch einen mit Diatomitsteinen[2]) ausgefüllten Blechmantel gegen Wärmeverlust nach außen geschützt waren. Das dünne Reagenzglas, in welchem sich die Lötstelle befand, tauchte etwa 10 cm tief ins Bad ein.

Einem Teilstrich des bereits auf S. 22 erwähnten Milli-Voltmeters entsprechen im Mittel 2,3° C., so daß auf ca. 0,23° C. genau abgelesen werden konnte. Nach Beendigung der Versuche wurden die Thermoelemente nachgeeicht, wobei sich eine gute Übereinstimmung mit der ersten Eichung vor Beginn der Versuche zeigte.

2. Eigentlicher Versuch.

Nachdem der Heizkörper in die zu untersuchende innere Kugel eingebaut, die Kugel verschraubt und aufgehängt, der Heizkörper an die Stromzuführung angeschlossen und das Thermoelement befestigt war, wurde die äußere Kugel verschraubt, auf ihrem Stativ fixiert und mit schmelzendem Eis umgeben. Dann hatte zunächst die Wasserstrahlpumpe im Rezipienten ein Vorvakuum zu schaffen, das im allgemeinen ungefähr 12 mm Quecksilberdruck betrug und in etwa drei Minuten erreicht war. Nun wurde die Sprengelpumpe in Tätigkeit gesetzt, mit Hilfe derselben auf ungefähr 1,8 bis 0,02 mm Quecksilberdruck evakuiert und während der ganzen Versuchsdauer weitergepumpt, um die infolge allenfallsiger Undichtheit eintretende Luft zu beseitigen. Ein höheres Vakuum ließ sich bei den großen Dichtungsflächen nicht erreichen, war auch nicht anzustreben, da nur der Einfluß der Konvektion der Luft vermieden werden sollte, was auch bei diesen Drücken, wie Kundt und Warburg[3]) erwähnt haben, tatsächlich der Fall ist. Nun wurde die Heizung eingeschaltet in der Stärke, welche zur Erreichung der zunächst gewünschten Temperatur nötig erschien. Die zu-

[1]) Mahlke s. Adam, Zeitschr. f. Instrumentenkunde, 1901, S. 191.
[2]) Bezogen von Grünzweig & Hartmann in Ludwigshafen a. Rh.
[3]) Kundt und Warburg, Pogg. Ann. **156**, 177, 1875.

geführte Wärme diente zunächst zur Erwärmung der inneren Heizkugel und zur Deckung des nach außen erfolgenden Wärmeverlustes, bis allmählich die abgegebene und die zugeführte Wärme sich das Gleichgewicht hielten und der Dauerzustand, der allen Versuchsergebnissen zu Grunde gelegt ist, eingetreten war.

Der Beharrungszustand stellte sich nach ca. 8 bis 12 Stunden ein und wurde bei den ersten Versuchen 2 bis $2^1/_2$ Stunden lang, später $1^1/_2$ bis 2 Stunden lang beobachtet; während des Dauerzustandes wurde meist alle Viertelstunden abgelesen. Nach Festlegung dieses ersten Versuchspunktes wurde dann auf höhere Heizung einreguliert und so mit jeweils steigender Heizung mehrere Dauerzustände (meist drei bis fünf) mit verschiedener Oberflächentemperatur beobachtet und bisweilen dann auch noch mit verminderter Heizung der eine oder andere Dauerzustand festgelegt. Das Kältebad, schmelzendes Eis, mußte namentlich bei höherer Heizung öfters erneuert werden. Im allgemeinen geschah das alle 24 Stunden. Bei hoher Heizung und damit hoher Innentemperatur entfernte sich auch die Temperatur an der Innenfläche der Messinghülle, wie leicht erklärlich, mehr und mehr von der Temperatur des schmelzenden Eises, es fand eben dann ein ziemlich starker Temperatursprung von Metall (Messing) auf die Flüssigkeit (Eis in Schmelzwasser) statt, der auch anderweitig schon festgestellt ist.

3. Auswertung der Versuche.

Im Beharrungszustand konnte durch Festlegung der zugeführten Spannung und Stromstärke jeweils die gesamte, von der betreffenden inneren Kugel abgegebene Wärmemenge bestimmt werden; durch die Ablesungen am Galvanometer ließen sich die elektromotorischen Kräfte der Thermoelemente und damit die Oberflächentemperaturen feststellen. Die abgegebene Wärmemenge setzt sich, da keine Konvektion mehr vorhanden, nur aus Strahlung und Luftleitung zusammen.

Die Wärmeleitung der Luft wächst mit der Temperatur, welche dieses Gas annimmt und ist innerhalb gewisser Grenzen unabhängig von dem Druck, unter welchem das leitende Gas steht.[1]) Dies erklärt sich nach der kinetischen Gastheorie daraus, daß bei einem durch größeren Druck verdichteten Gas zwar die Anzahl der Moleküle, welche die Wärme übertragen können, größer ist, dafür aber die Wege der einzelnen Moleküle, die sog. freie Weglänge, kleiner sind. Dieser letzte Satz könnte zu Ungereimtheiten führen, wenn man annehmen wollte, daß er bis zu jeder beliebigen Verdichtung oder Verdünnung des Gases gültig sei. Man muß aber bedenken, daß die Anwendung des Satzes auf solche Zustände, die sehr weit vom Mittelzustande abweichen, ihre selbstverständlichen Grenzen hat, indem, was hier vornehmlich in Frage kommt, das Gas nicht so weit verdünnt sein darf, daß die mittlere Weglänge der Moleküle zu groß wird, um ihre höheren Potenzen vernach-

[1]) Siehe Clausius, Mechan. Wärmetheorie, Bd. 3, S. 148, 1891.

lässigen zu können. Dies ist aber nach Kundt und Warburg[1]) bei Drücken bis zu 0,5 mm nicht der Fall und, wie folgende Nebenversuche bestätigen sollen, auch in dem vom Verfasser behandelten Druckbereich nicht zu berücksichtigen: Eine Messingkugel wurde in der beschriebenen Versuchsanordnung eingebaut, der Rezipient auf einen Druck von 1,15 mm Hg-Säule evakuiert, die innere Kugel auf 56° C. erhitzt und dann der Dauerzustand $1^1/_2$ Stunden lang beobachtet. Nun wurde bei vollkommen konstant gehaltener Heizung der Druck mehr und mehr verringert. Es zeigte sich, daß trotz der Veränderung des Drucks von 1,15 auf 0,175 mm Hg-Säule innerhalb einer Stunde eine Änderung der Oberflächentemperaturen nicht eintrat. Bei einem weiteren Versuch war dieselbe Messingkugel auf 338° C. erhitzt, der Druck sank in einer Stunde von 0,360 auf 0,095 mm Hg-Säule; auch hier änderte sich bei konstanter Heizung die Oberflächentemperatur nicht im mindesten.

Die durch Leitung abgegebene Wärme läßt sich leicht berechnen, da die Temperaturen der Grenzflächen bekannt sind und da die Wärmeleitungszahl der Luft nach verschiedenen Beobachtungen von Stefan,[2]) Kundt und Warburg,[3]) Winkelmann,[4]) Grätz,[5]) Schleiermacher,[6]) Müller,[7]) Eckerlein,[8]) Schwarze,[9]) Mehlis[10]) ziemlich eindeutig bestimmt ist.

Auf Grund dieser Beobachtungen läßt sich ein Mittelwert bestimmen, nämlich:

$$k = 0{,}0000549\ (1 + 0{,}0024 \cdot t)\ \text{cal cm}^{-1}\ \text{sec}^{-1}\ (^\circ\text{C.})^{-1}$$

oder

$$k = 0{,}02\ (1 + 0{,}0024 \cdot t)\ \frac{\text{W. E.}}{\text{st m } (^\circ\text{C.})}.$$

Der Unterschied zwischen der berechneten, durch Leitung abgegebenen Wärmemenge und dem experimentell bestimmten Gesamtwärmeverlust stellt dann die durch Strahlung abgegebene Wärme dar. Jetzt lassen sich aus diesem Strahlungsverlust und den gemessenen Oberflächentemperaturen die Beziehungen ermitteln, die eine Prüfung des Stefanschen Gesetzes gestatten. An den Resultaten des Versuches 1 der Versuchsreihe I sei obige Rechenmethode praktisch durchgeführt.

Die mit Lampenruß geschwärzte Messingkugel hat einen äußeren Durchmesser = 0,101 m, somit eine Oberfläche von 0,03203 qm und war in der

---

[1]) Kundt und Warburg, l. c.
[2]) Stefan, Wiener Berichte **65**, 2, 45, 1872.
[3]) Kundt und Warburg, Pogg. Ann. **156**, 177, 1875.
[4]) Winkelmann, Pogg. Ann. **157**, 497, **159**, 177, 1876; Wied. Ann. **44**, 1891.
[5]) Grätz, Wied. Ann. **14**, 1881.
[6]) Schleiermacher, Wied. Ann. **34**. 623, 1888.
[7]) Müller, Sitzungsber. d. Phys.-chem. Soz. Erlangen, S. 85, 1901.
[8]) Eckerlein, Drud. Ann. **3**, 1900.
[9]) Schwarze, Drud. Ann. **11**, 303, 1144.
[10]) Mehlis, Dissertation, Halle 1902.

Bemerkung: Eine Zusammenstellung dieser Beobachtungen findet sich auch in: Winkelmann, Handbuch der Physik, Bd. III, S. 535, 1906.

ebenfalls geschwärzten evakuierten Messingkugel von 0,250 m Durchmesser (licht) aufgehängt und elektrisch erwärmt worden. Mit einer konstanten Heizung von 9,74 Volt mal 0,986 Amp. = 9,604 Watt oder $\frac{9{,}604 \cdot 0{,}239 \cdot 3600}{1000}$ = 8,263 Wärmeeinheiten pro Stunde konnte die Oberfläche der inneren Kugel auf 49,2° C. = 322,2° absolut erwärmt werden, während die Oberflächentemperatur der Umhüllung sich auf 0,2° C. = 273,2° absolut einstellte. Infolgedessen ist die Wärmeleitzahl der Luft

$$k = 0{,}02 \left(1 + 0{,}0024 \cdot \frac{49{,}2 + 0{,}2}{2}\right) = 0{,}0212 \text{ W. E. st}^{-1} \text{ m}^{-1} (^{\circ}\text{ C.})^{-1},$$

daher ist die durch Leitung von der inneren Kugel an die äußere abgegebene Wärme

$$\begin{aligned} W_L &= \frac{4 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \pi \cdot k \cdot (t_2 - t_1)}{r_1 - r_2} \\ &= \frac{4 \cdot 0{,}125 \cdot 0{,}0505 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}0212 \cdot 49{,}0}{0{,}125 - 0{,}0505} \\ &= 1{,}106 \text{ W. E. st}^{-1} \end{aligned}$$

pro Oberfläche.

Subtrahiert man diesen Wert von dem Gesamtverlust, so erhält man den Betrag der von der Kugeloberfläche ausgestrahlten Wärme gleich

$$W_S = 8{,}263 - 1{,}106 = 7{,}157 \text{ W. E. st}^{-1}$$

pro Oberfläche, während pro Quadratmeter ausgestrahlt wurden

$$W_S = 7{,}157 : 0{,}03203 = 223{,}45 \text{ W. E. st}^{-1} \text{ m}^{-2}.$$

Nun muß nach der auf Seite 15 entwickelten Formel 10) (unter der Voraussetzung, daß das Stefansche Gesetz erfüllt ist)

$$W_S = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}}$$

sein.

Da die sich gegenseitig zustrahlenden Kugeloberflächen beide aus demselben Material, nämlich berußtem Messing, bestehen, so ist $C_1 = C_2$; ferner ist nach Kurlbaum[1]) für den absolut schwarzen Körper

$$C = 4{,}61 \text{ W. E. st}^{-1} \text{ m}^{-2} (^{\circ}\text{ C.})^{-4}$$

zu setzen. Endlich ist

$$T_1 = 322{,}2^{\circ}, \quad T_2 = 273{,}2^{\circ}$$

und es folgt daher:

---

[1]) Kurlbaum, l. c.

$$223{,}45 = \frac{3{,}222^4 - 2{,}732^4}{\frac{2}{C_1} - \frac{1}{4{,}61}} = \frac{107{,}78 - 55{,}71}{\frac{2}{C_1} - 0{,}217},$$

also

$$C_1 = 4{,}44 \text{ W. E. st}^{-1} \text{ m}^{-2} (^0 \text{ C.})^{-4}.$$

Infolgedessen ist $C_1 = 4{,}44$, die Strahlungskonstante für Lampenruß bei 49,2° C. unter der Voraussetzung, daß dieser Stoff das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz erfüllt. Im nachfolgenden sind nun die einzelnen Stoffe, deren Strahlung untersucht werden sollte, beschrieben und die mit denselben auf Grund der beschriebenen Versuchsanordnung erzielten Ergebnisse zusammengestellt. Es wurde geprüft, inwieweit jedes einzelne Material dem Stefanschen Gesetz folgt und inwieweit die unter 10) angegebene Formel erfüllt ist. Die nachfolgenden Tabellen enthalten eine Zusammenstellung der jeweils bei der betreffenden Versuchsreihe erzielten Rechenresultate, während in den beigegebenen Schaubildern (Fig. 7 und 8) die Gesamtwärmeabgabe der betreffenden Kugeloberfläche und die Teilwerte der Strahlung und Leitung aufgetragen sind.

Die umgebende Hülle, deren Strahlungskonstante C_2 in der Gleichung 10) auftritt, bestand stets aus berußtem Messing. Es mußte daher zunächst in der soeben bereits erwähnten Versuchsreihe I der Strahlungskoeffizient für Lampenruß bestimmt werden, bevor die Feststellung anderer Strahlungskonstanten vorgenommen werden konnte.

d) Versuchsergebnisse.

1. Untersuchte Stoffe.

Versuchsreihe I.

Lampenruss.

Die Oberfläche der im Innern aufgehängten Messingkugel wurde zunächst mit einem Gemisch von Benzol und Lampenruß bestrichen und dann mit der Flamme einer Terpentinlampe berußt. In gleicher Weise wurde die innere Oberfläche der umhüllenden Messingkugel behandelt, die, wie erwähnt, auch bei allen übrigen Versuchen diese Oberflächenbeschaffenheit beibehielt. Bei der vorliegenden Versuchsreihe standen sich also zwei Oberflächen von gleicher Beschaffenheit gegenüber und es konnte somit in der auf Seite 15 angegebenen Formel 10) $C_1 = C_2$ gesetzt werden, so daß diese die Form annimmt

$$W = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{2}{C_1} - \frac{1}{C}}.$$

Aus dieser Formel wurde der Strahlungskoeffizient C_1 berechnet und das Stefansche Gesetz auf seine Anwendbarkeit geprüft. Da die Temperatur der äußeren Kugel, deren Strahlungskoeffizient hier zu bestimmen war, im

Maximum nur 19,6° erreichte, wurden die Versuche mit dieser Substanz nicht über 50° ausgedehnt, sondern nur bei Oberflächentemperaturen von 0 bis 50° unternommen. Es ergaben sich, wie nachfolgende Tabelle I zeigt, für C_1 (C_2) die Werte

oder
$$C_1 = 4{,}46 \quad 4{,}41 \quad 4{,}44 \quad \text{W. E. m}^{-2}\,\text{st}^{-1}\,(^0\,\text{C.})^{-4}$$
$$\sigma_1 = 1{,}24 \quad 1{,}22 \quad 1{,}23 \quad 10^{-12}\,\text{cal cm}^{-2}\,\text{sec}^{-1}\,(^0\,\text{C.})^{-4},$$

demnach eine gute Übereinstimmung mit dem Stefanschen Gesetz, die dessen Anwendung auf Lampenruß berechtigt erscheinen läßt. Man kann demnach im Mittel als Strahlungskonstante für Ruß setzen:

$$C_1 = 4{,}44 \quad \text{W. E. m}^{-2}\,\text{st}^{-1}\,(^0\,\text{C.})^{-4}$$
$$\sigma_1 = 1{,}23 \quad 10^{-12}\,\text{cal cm}^{-2}\,\text{sec}^{-1}\,(^0\,\text{C.})^{-4}.$$

Da die Strahlungskonstante des absolut schwarzen Körpers nach Kurlbaum[1]) 4,61 bzw. 1,28 beträgt, so würde die Strahlung des hier verwendeten Lampenrußes 96,3% der Strahlung des absolut schwarzen Körpers darstellen, was mit den Beobachtungen von Angström,[2]) der 97,6% und Kurlbaum,[3]) der 94,9% angibt, recht gut übereinstimmt.

Tabelle I.

Zur Versuchsreihe I.

Lampenruss.

Nummer des Versuchs	1	2	3
Datum des Versuchs	20. I. 09	20. I. 09	19. I. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule	0,438	0,400	0,433
Gesamt-Wärmeabgabe in Watt (pro Kugeloberfläche)	2,06	3,99	9,60
Desgl. in W. E. pro Stunde und Oberfläche	1,77	3,43	8,26
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in °C.	12,4	23,4	49,2
Desgl. absolut	285,4	296,4	322,2
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in °C.	0,0	0,2	0,2
Desgl. absolut	273,0	273,2	273,2
Temperatur-Unterschied der beiden Kugeln	12,4	23,2	49,0
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. st.$^{-1}$ m^{-1} (° C.)$^{-1}$	0,0203	0,0206	0,0212
Durch Leitung abgegebene Wärme in W. E. st.$^{-1}$ pro Oberfläche	0,27	0,51	1,11
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st.$^{-1}$ pro Oberfläche	1,50	2,92	7,15
Prozente der Gesamtwärme für Leitung	15,1	14,8	13,4
Prozente der Gesamtwärme für Strahlung	84,9	85,2	86,6
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Quadratmeter	46,8	91,2	223,2
Koeffizient C_1 nach dem Stefanschen Gesetz in W. E. m^{-2} st.$^{-1}$ (° C.)$^{-4}$	4,46	4,41	4,44
σ_1 in cal cm^{-2} sec^{-1} (° C.)$^{-4}$	$1{,}24 \cdot 10^{-12}$	$1{,}22 \cdot 10^{-12}$	$1{,}23 \cdot 10^{-12}$

[1]) Kurlbaum, Wied. Ann. **65**, 746, 1898.
[2]) Angström, Wied. Ann. **36**, 715, 1899.
[3]) Kurlbaum, Wied. Ann. **67**, 1889.

Versuchsreihe II.

Messing.

Zur Verwendung kam für die Herstellung der inneren Messingkugel ein Messingblech aus Messingprima (Halbtombak) von Wieland in Ulm a. D. Die Kugel wurde in der Oberflächenbeschaffenheit untersucht, welche sie nach dem Durchdrücken auf Kugelform angenommen hatte, und eine weitere Bearbeitung wie Polieren unterlassen, so daß das untersuchte Material als „Messing mit matter Oberfläche“ bezeichnet werden kann. Die Versuche ergaben bei Anwendung des Stefanschen Gezetzes zwischen den Temperaturen 55,8 bis 338,2° C. folgende Strahlungskonstanten (nach Tabelle II)

$C_1 = 1{,}06 \quad 1{,}03 \quad 1{,}02 \quad 1{,}04$ W. E. $m^{-2}\ st^{-1}\ (^0\ C.)^{-4}$

$\sigma_1 = 0{,}295 \quad 0{,}287 \quad 0{,}283 \quad 0{,}289 \quad 10^{-12}$ cal etc.

so daß also auch hier eine Proportionalität der Gesamtstrahlung mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur bestätigt ist.

Als Mittelwerte ergeben sich dann

$C_1 = 1{,}03$ W. E. bzw. $\sigma_1 = 0{,}295\ 10^{-12}$ cal etc.,

für die Strahlungskonstante des matten Messing.

Eine graphische Darstellung der Versuchsergebnisse findet sich in Fig. 7.

Fig. 7.

Wärmeabgabe einer matten Messingkugel von 101 mm äuß. Durchm. = 0,032 qm Oberfläche.

Versuchsreihe II.

a **Gesamtwärmeabgabe** in ihrer Abhängigkeit von der Oberflächen-Temperatur.
b Durch **Strahlung abgegebene Wärme** in ihrer Abhängigkeit von der Oberflächen-Temperatur.
c Durch **Wärmeleitung der Luft** abgegebene **Wärme** in ihrer Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen strahlendem und bestrahltem Körper.
d **Temperatur der Hülle** (bestrahlter Körper) bei verschiedener Gesamtwärmeabgabe.

Tabelle II.

Zur Versuchsreihe II.

Messing matt.

Nummer des Versuchs	1	2	3	4
Datum des Versuchs	14. I. 09	15. I. 09	15. I. 09	16. I. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule	0,585	0,352	0,203	0,187
Wärmeabgabe insgesamt, in Watt pro Kugeloberfläche	3,90	9,39	24,36	63,83
Desgl. in W. E. pro Stunde und Oberfläche	3,36	8,08	20,96	54,92
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in ^{0} C.	55,8	111,4	206,8	338,2
Desgl. absolut	328,8	384,4	479,8	611,2
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in ^{0} C.	0,1	0,8	2,8	6,0
Desgl. absolut	273,1	273,8	275,8	279,0
Temperatur-Unterschied der beiden Kugeln	55,7	110,6	204,0	332,2
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. m^{-1} st^{-1} $(^0 C.)^{-1}$	0,0213	0,0227	0,0250	0,0283
Durch Leitung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	1,26	2,67	5,43	10,01
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	2,10	5,41	15,53	44,91
Prozente der Gesamtwärme für Leitung	37,6	33,1	25,3	18,2
Prozente der Gesamtwärme f. Strahlung	62,4	66,9	74,7	81,8
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Quadratmeter	65,6	168,9	484,9	1402,1
Koeffizient C_1 nach dem Stefanschen Gesetz in W. E. st^{-1} m^{-2} $(^0 C.)^{-4}$	1,6	1,03	1,02	1,04
σ_1 in cal sec^{-1} cm^{-2} $(^0 C.)^{-4}$	$0{,}295 \cdot 10^{-12}$	$0{,}287 \cdot 10^{-12}$	$0{,}283 \cdot 10^{-12}$	$0{,}289 \cdot 10^{-12}$

Versuchsreihe III.

Kupfer.

Zur Verwendung kam für die Herstellung der inneren Kugel ein Kupferblech aus den Mansfelder Kupferwerken in Mansfeld i. S., welches leicht poliert, aber sonst unverändert gelassen wurde, so daß das untersuchte Material als „Kupfer schwach poliert“ bezeichnet werden kann. Da mit Steigen der Temperatur die Kupferoberfläche mehr und mehr anläuft, und die Färbung sich verdunkelt, so wurden die Versuche von 56,8 bis nur 272,6^0 C. ausgedehnt.

Wie Tabelle III zeigt, ergaben sich bei Anwendung des Stefanschen Strahlungsgesetzes folgende Koeffizienten

$C_1 = 0{,}76 \quad 0{,}85 \quad 0{,}72 \quad 0{,}82$ W. E. m^{-2} st^{-1} $(^0 C.)^{-4}$
$\sigma_1 = 0{,}21 \quad 0{,}24 \quad 0{,}20 \quad 0{,}22$ 10^{-12} cal cm^{-2} sec^{-1} $(^0 C.)^{-4}$,

weshalb mit einer für die Praxis hinreichenden Annäherung auch hier das Stefansche Gesetz erfüllt ist und als Mittelwert

$$C_1 = 0{,}79 \quad \text{W. E. bzw. } \sigma_1 = 0{,}22 \quad 10^{-12} \text{ cal}$$

für die Strahlungskonstante von Kupfer gesetzt werden kann.

Tabelle III.

Zur Versuchsreihe III.

Kupfer schwach poliert.

Nummer des Versuchs	1	2	3	4
Datum des Versuchs	28. I. 09	27. I. 09	29. I. 09	27. I. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule	0,800	0,720	0,673	0,480
Gesamt-Wärmeabgabe in Watt pro Kugeloberfläche	3,28	12,76	23,07	34,19
Desgl. in W. E. pro Stunde und Oberfläche	2,82	10,99	19,85	29,42
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in ^{0}C.	56,8	149,6	231,2	272,6
Desgl. absolut	329,8	422,6	504,2	545,6
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in ^{0}C.	0,2	0,8	2,6	3,0
Desgl. absolut	273,2	273,8	275,6	276,0
Temperatur-Unterschied der beiden Kugeln	56,6	148,8	228,6	269,6
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. st^{-1} m^{-1} $(^0\text{C.})^{-1}$	0,0214	0,0236	0,0256	0,0266
Durch Leitung der Luft abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	1,29	3,74	6,23	7,63
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	1,53	7,25	13,62	21,79
Prozente der Gesamtwärme für Leitung	45,7	34,0	31,4	25,9
Prozente der Gesamtwärme f. Strahlung	54,3	66,0	68,6	74,1
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Quadratmeter	47,8	226,3	425,2	680,3
Koeffizient C_1 des Stefanschen Gesetzes in W. E. st^{-1} m^{-2} $(^0\text{C.})^{-4}$	0,76	0,85	0,72	0,82
σ_1 in cal sec^{-1} cm^{-2} $(^0\text{C.})^{-4}$	$0{,}210 \cdot 10^{-12}$	$0{,}237 \cdot 10^{-12}$	$0{,}200 \cdot 10^{-12}$	$0{,}216 \cdot 10^{-12}$

Versuchsreihe IV.

Schmiedeisen matt oxydiert.

Zur Verwendung kam für die Herstellung der inneren Kugel ein Eisenblech aus steierischem Holzkohleneisen, dessen Oberfläche stark oxydiert und in ihrer Färbung tief dunkelschwarz, dabei aber sehr glatt war, und keinerlei Rauhigkeiten aufwies. Das untersuchte Material kann als „Schmiedeisen matt oxydiert“ bezeichnet werden.

An dieser Stelle sei noch hingewiesen auf Versuche, welche von Nusselt[1]) über die Isolierfähigkeit von Luftschichten vorgenommen worden,

[1]) Nusselt, Dissertation, Technische Hochschule München, S. 76, 1907.

und zwar an zwei konzentrischen Schmiedeisenrohren von ebenfalls oxydierter Oberfläche (mit Walzhaut). Bei einer Oberflächentemperatur von 86° C. bzw. 205° C. fand Nusselt 4,3 bzw. 4,5 W. E. m^{-2} st^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$ als Strahlungskonstante dieses Materials, und außerdem eine gute Übereinstimmung mit dem Stefanschen Gesetz.

Die hier vom Verfasser zwischen 25,8 und 356,4° C. angestellten Versuche ergaben unter Zugrundelegung des Stefanschen Strahlungsgesetzes, wie auch aus Tabelle IV hervorgeht, die Koeffizienten

$C_1 = 4{,}41 \quad 4{,}37 \quad 4{,}41 \quad 4{,}42$ W. E. m^{-2} st^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$
$\sigma_1 = 1{,}224 \quad 1{,}213 \quad 1{,}224 \quad 1{,}229$ 10^{-12} cal cm^{-2} sec^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$,

so daß also auch hier dieses Gesetz hinreichend gute Bestätigung findet und im Mittel in vollkommener Übereinstimmung mit Nusselt

$$C_1 = 4{,}40 \quad \text{W. E. bzw. } \sigma_1 = 1{,}222 \quad 10^{-12} \text{ cal}$$

als Strahlungskonstante für oxydiertes Schmiedeisen gesetzt werden kann

Tabelle IV.

Zur Versuchsreihe IV.

Schmiedeisen, matt, oxydiert.

Nummer des Versuchs . . .	1	2	3	4
Datum des Versuchs	3. II. 09	1. II. 09	1. II. 09	2. II. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule . .	1,840	0,543	0,320	0,230
Gesamt-Wärmeabgabe in Watt pro Kugeloberfläche	4,32	43,67	108,38	250,49
Desgl. in W. E. pro Stunde und Oberfläche	3,72	37,58	93,25	215,52
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in ^{0} C.	25,8	146,4	241,0	356,4
Desgl. absolut	298,8	419,4	514,0	629,4
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in ^{0} C.	1,0	3,2	7,6	19,6
Desgl. absolut	274,0	276,2	280,6	292,6
Temperatur-Unterschied der beiden Kugeln	24,8	143,2	233,4	336,8
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. st^{-1} m^{-1} $(^0\,C.)^{-1}$	0,0206	0,0235	0,0260	0,0290
Durch Leitung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche . .	0,54	3,58	6,46	10,39
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche . .	3,18	34,00	86,79	205,13
Prozente der Gesamtwärme für Leitung	14,6	9,5	6,9	4,8
Prozente der Gesamtwärme f. Strahlung	85,4	90,5	93,1	95,2
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Quadratmeter .	99,3	1061,5	2709,6	6404,1
Koeffizient C_1 nach dem Stefanschen Gesetz in W. E. st^{-1} m^{-2} $(^0\,C.)^{-4}$	4,41	4,37	4,41	4,42
σ_1 in cal sec^{-1} cm^{-2} $(^0\,C.)_{-4}$ . . .	$1{,}224 \cdot 10^{-12}$	$1{,}213 \cdot 10^{-12}$	$1{,}224 \cdot 10^{-12}$	$1{,}229 \cdot 10^{-12}$

Versuchsreihe V.

Schmiedeisen hochblank poliert.

Zur Verwendung kam für die Herstellung der inneren Kugel dasselbe Material wie bei Versuchsreihe IV, nur daß diesmal die Oberfläche abgeschliffen und, mittelst Wiener Kalk, Hochpolitur erhalten hatte. Mit zunehmender Oberflächentemperatur lief nun die oberste Schicht immer mehr an, so daß sich innerhalb des Temperaturbereichs von 43,4 bis 210,2° C. die Färbung des blanken Schmiedeisens mehr und mehr veränderte und dunkler wurde, weshalb davon abgesehen wurde, auf höhere Temperaturen überzugehen.

Auf diese Veränderung der Farbe ist wohl auch das Anwachsen des Strahlungskoeffizienten (nach Stefan) mit zunehmender Oberflächentemperatur zurückzuführen, denn es ergaben sich die Werte (siehe auch Tabelle V)

$$C_1 = 1{,}289 \quad 1{,}321 \quad 1{,}366 \quad \text{W. E. m}^{-2}\,\text{st}^{-1}\,(^0\,\text{C.})^{-4}$$
$$\sigma_1 = 0{,}358 \quad 0{,}367 \quad 0{,}380 \quad 10^{-12}\,\text{cal cm}^{-2}\,\text{sec}^{-1}\,(^0\,\text{C.})^{-4}.$$

Immerhin mag es für die Zwecke der Praxis genügen, auch hier einen Mittelwert zu wählen und für die Strahlungskonstante des hochpolierten Schmiedeeisens den Wert

$$C_1 = 1{,}328 \quad \text{W. E. bzw. } \sigma_1 = 0{,}368 \quad 10^{-12}\,\text{cal}$$

zu setzen.

Tabelle V.

Zur Versuchsreihe V.

Schmiedeisen hochblank poliert.

Nummer des Versuchs	1	2	3
Datum des Versuchs	5. II. 09	6. II. 09	5. II. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule	0,600	0,617	0,500
Gesamt-Wärmeabgabe in Watt pro Oberfläche der Kugel	3,24	16,38	31,03
Desgl. in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	2,79	14,09	26,70
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in ^{0} C.	43,4	146,2	210,2
Desgl. absolut	316,4	419,2	483,2
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in ^{0} C.	0,2	1,4	2,0
Desgl. absolut	273,2	274,4	275,0
Temperatur-Unterschied der beiden Kugeln	43,2	144,8	208,2
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. $st^{-1}\,m^{-1}\,(^0\,C.)^{-1}$	0,0210	0,0235	0,0251
Durch Leitung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	0,97	3,62	5,57
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	1,82	10,47	21,13
Prozente der Gesamtwärme für Leitung	34,8	25,7	20,9
Prozente der Gesamtwärme für Strahlung	65,2	74,3	79,1
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Quadratmeter	56,8	326,9	659,7
Koeffizient C_1 nach dem Stefanschen Gesetz in W. E. $st^{-1}\,m^{-2}\,(^0\,C.)^{-4}$	1,289	1,321	1,366
σ_1 in cal $sec^{-1}\,cm^{-2}\,(^0\,C.)^{-4}$	$0{,}358 \cdot 10^{-12}$	$0{,}367 \cdot 10^{-12}$	$0{,}380 \cdot 10^{-12}$

Versuchsreihe VI.

Zink.

Zur Verwendung kam für die Herstellung der inneren Kugel ein Zinkblech aus badischem Walzzink, welches einer weiteren Bearbeitung nicht unterzogen wurde, sondern mit der Oberflächenbeschaffenheit untersucht wurde, welche es nach dem Durchdrücken auf Kugelform angenommen hatte. Unter Anwendung des Stefanschen Gesetzes ergaben sich innerhalb der Temperaturen von 54,6 bis 286,8° C. die Strahlungskoeffizienten:

$$C_1 = 1{,}009 \quad 0{,}901 \quad 0{,}961 \quad 1{,}027 \quad \text{W. E. m}^{-2}\ \text{st}^{-1}\ (^0\,\text{C.})^{-4}$$
$$\sigma_1 = 0{,}280 \quad 0{,}250 \quad 0{,}267 \quad 0{,}285 \quad 10^{-12}\ \text{cal cm}^{-2}\ \text{sec}^{-1}.$$

Wenn auch hier der Koeffizient des Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetzes ein Schwanken zeigt, so kann doch für die Zwecke der Praxis mit einer mittleren Strahlungskonstanten von

$$C_1 = 0{,}974 \text{ W. E. bzw. } \sigma_1 = 0{,}271\ 10^{-12} \text{ cal}$$

für Zink gerechnet werden.

Tabelle VI.

Zur Versuchsreihe VI.

Zink.

Nummer des Versuchs	1	2	3	4
Datum des Versuchs	10. II. 09	11. II. 09	11. II. 09	12. II. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule	0,693	0,310	0,290	0,250
Gesamt-Wärmeabgabe in Watt pro Kugeloberfläche	3,67	11,59	27,99	44,52
Desgl. in W. E. pro Stunde und Oberfläche	3,15	9,97	24,09	38,31
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in ^{0}C.	54,6	138,2	229,4	286,8
Desgl. absolut	327,6	411,2	502,4	559,8
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in ^{0}C.	0,0	0,8	2,0	2,8
Desgl. absolut	273,0	273,8	275,0	275,0
Temperatur-Unterschied der 2 Kugeln	54,6	137,4	227,4	284,0
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. m^{-1} st^{-1} $(^0\,C.)^{-1}$	0,0213	0,0233	0,0256	0,0270
Durch Leitung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	1,24	3,41	6,19	8,16
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	1,91	6,56	17,90	30,15
Prozente der Gesamtwärme für Leitung	39,2	34,2	25,7	21,3
Prozente der Gesamtwärme f. Strahlung	60,8	65,8	74,3	78,7
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Quadratmeter	59,6	204,8	558,8	941,3
Koeffizient C_1 nach dem Stefanschen Gesetz in W. E. st^{-1} m^{-2} $(^0\,C.)^{-4}$	1,009	0,901	0,961	1,027
σ_1 in cal sec^{-1} cm^{-2} $(^0\,C.)^{-4}$	$0{,}280 \cdot 10^{-12}$	$0{,}250 \cdot 10^{-12}$	$0{,}267 \cdot 10^{-12}$	$0{,}285 \cdot 10^{-12}$

Versuchsreihe VII.

Gusseisen.

Zur Verwendung kam für die Herstellung der inneren Kugel Gußeisen (gewöhnlicher Eisenguß) der Firma F. S. Kustermann, München. Die Kugel war nach einem größten Kreis geschnitten und deren beide Hälften mit einem aufgedrehten Gewinde versehen, so daß sie glatt zusammengeschraubt werden konnten. Die Oberfläche war tief dunkel, rauher als bei Schmiedeisen und mit einer Oxydschicht belegt. Die zwischen 42,0 und 246,0° C. angestellten Versuche ergaben auch hier unter Anwendung des Stefanschen Gesetzes ein leichtes Ansteigen der Koeffizienten, nämlich, wie aus Tabelle VII hervorgeht,

$$C_1 = 4{,}39 \quad 4{,}46 \quad 4{,}59 \quad \text{W. E. st}^{-1}\,\text{m}^{-2}\,(^0\,\text{C.})^{-4}$$
$$\sigma_1 = 1{,}218 \quad 1{,}240 \quad 1{,}278 \quad 10^{-12}\,\text{cal sec}^{-1}\,\text{cm}^{-2}\,(^0\,\text{C.})^{-4}.$$

Es wurde, wie bei Schmiedeisen blank und Zink (Versuchsreihen V und VI), auch hier davon abgesehen, das Stefansche Gesetz zu modifizieren bzw. das Gesetz von Paschen mit verändertem Koeffizienten (siehe auch Formel 10 a) anzuwenden, da es für die Zwecke der Praxis hinreichen dürfte, aus obigen Zahlen einen Mittelwert von

$$C_1 = 4{,}48 \text{ W. E. bzw. } \sigma_1 = 1{,}244\ 10^{-12} \text{ cal}$$

als Strahlungskonstante für Gußeisen oxydiert (nach Stefan) zu benützen.

Tabelle VII.

Zur Versuchsreihe VII.

Gusseisen.

Nummer des Versuchs	1	2	3
Datum des Versuchs	14. II. 09	13. II. 09	13. II. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule	0,226	0,014	0,016
Gesamt-Wärmeabgabe in Watt	9,78	55,75	147,82
Desgl. in W. E. st^{-1} pro Kugeloberfläche	8,41	47,97	127,16
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in ^{0} C.	42,0	145,8	246,0
Desgl. absolut	315,0	418,8	519,0
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in ^{0} C.	0,6	3,0	8,0
Desgl. absolut	273,6	276,0	281,0
Temperatur-Unterschied der 2 Kugeln	41,4	142,8	238,0
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. $m^{-2}\,st^{-1}\,(^0\,C.)^{-1}$	0,0210	0,0236	0,0261
Durch Leitung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	1,14	4,40	8,11
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	7,27	43,57	119,05
Prozente der Gesamtwärme für Leitung	13,3	9,2	6,4
Prozente der Gesamtwärme für Strahlung	86,3	90,8	93,6
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-2} pro Quadratmeter	179,7	1077,1	2943,1
Koeffizient C_1 des Stefanschen Gesetzes in W. E. $st^{-1}\,m^{-2}\,(^0\,C.)^{-4}$	4,39	4,46	4,59
σ_1 in cal $sec^{-1}\,cm^{-2}\,(^0\,C.)^{-4}$	$1{,}218 \cdot 10^{-12}$	$1{,}240 \cdot 10^{-12}$	$1{,}278 \cdot 10^{-12}$

Versuchsreihe VIII.

Kalkmörtel.

Über den auf Seite 21 beschriebenen Heizkörper, der bei allen vorhergehenden Versuchsreihen in die zu untersuchende Metallkugel eingebaut wurde, ist jetzt eine ca. 10 mm starke Schicht von Kalkmörtel (mittelgrober Sand + Kalk + Wasser) gelegt worden, wie solcher zum Verputzen der Wände von bewohnten Räumen etc. meist zur Verwendung kommt. Dadurch konnte die Strahlungskonstante jenes Materials untersucht werden, das in der Heiztechnik als bestrahlter Körper zumeist in Frage kommt. Die Oberflächentemperatur wurde so gemessen, daß das Thermoelement in die Mörtelschicht am untersten Punkt der Kugel vollkommen eingebaut war, samt Zuführungsdrähten (diese auf ca. 100 mm Länge), und mittelst des Wärmeleitungskoeffizienten von Kalkmörtel $k = 0{,}68$ W. E. $m^{-1}\,st^{-1}\,(^0C.)^{-1}$ (vgl. S. 25) auf die Oberflächentemperatur extrapoliert wurde. Die Versuche wurden vorgenommen bei Oberflächentemperaturen von 21,0 bis 83,1° und ergaben folgende Werte für C_1 unter Zugrundelegung des Stefanschen Gesetzes:

$$C_1 = 4{,}40 \quad 4{,}39 \quad 4{,}12 \quad \text{W. E. st}^{-1}\,\text{m}^{-2}\,(^0\,\text{C.})^{-4}$$
$$\sigma_1 = 1{,}224 \quad 1{,}218 \quad 1{,}143 \quad 10^{-12}\,\text{cal sec}^{-1}\,\text{cm}^{-2}\,(^0\,\text{C.})^{-4}.$$

Wenn auch diese Werte etwas hoch scheinen bei der hellen Farbe des Materials, so muß doch berücksichtigt werden, daß die Rauhigkeit der Oberfläche einen wesentlichen Einfluß auf das Strahlungsvermögen ausübt. Dadurch daß nämlich auf einer rauhen Oberfläche kleine Vertiefungen, Mulden und Löcher vorhanden sind, welche mehr oder minder sich der Form eines Hohlraums nähern, der ja vollkommen schwarze Strahlung[1]) aussendet, wird auch das dem betreffenden Körper zukommende Strahlungsvermögen sich mehr dem des schwarzen Körpers nähern als man nach der Helligkeit der Oberflächenfärbung annehmen möchte.

Auch Péclet[2]) findet für Mauerwerk einen ziemlich nahe beim Ruß liegenden Strahlungskoeffizienten, nämlich 3,60 gegenüber 4,01 bei Ruß. Hiemit stehen in Einklang die Beobachtungen von Melloni[3]) und H. Knoblauch,[4]) welche ergaben, daß geritzte Metalloberflächen ein größeres Strahlungsvermögen besitzen als glatte.

Als Mittelwert mag nun aus den vom Verfasser gefundenen Zahlen $C_1 = 4{,}30$ W. E. bzw. $\sigma_1 = 1{,}195\ 10^{-12}$ cal etc. für die Strahlungskonstante von Kalkmörtel gesetzt werden.

---

[1]) S. z. B. O. Lummer, Ziele der Leuchttechnik. Berlin 1903, S. 57.

[2]) Péclet, l. c.

[3]) Melloni, Pogg. Ann. **45**, 57, 1838.

[4]) H. Knoblauch, Pogg. Ann. **70**, 337, 1847.

Tabelle VIII.

Zur Versuchsreihe VIII.

Kalkmörtel.

Nummer des Versuchs	1	2	3
Datum des Versuchs	24. II. 09	24. II. 09	25. II. 09
Druck der Luft in mm Hg-Säule	0,900	0,820	0,780
Gesamt-Wärmeabgabe in Watt	4,31	9,75	21,33
Desgl. in W. E. st^{-1} pro Kugeloberfläche . . .	3,70	8,39	18,35
Oberflächen-Temperatur der inneren Kugel in ^{0} C. (durch Extrapolation gefunden)	21,0	43,5	83,1
Desgl. absolut	293,0	316,5	356,1
Oberflächen-Temperatur der äußeren Kugel in ^{0} C.	0,0	0,2	1,2
Desgl. absolut	273,0	273,2	274,2
Temperatur-Unterschied der beiden Kugeln . .	21,0	43,3	81,9
Wärmeleitzahl der Luft in W. E. st^{-1} m^{-1} $(^0 C.)^{-1}$	0,0205	0,0210	0,0220
Durch Leitung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	0,54	1,14	2,26
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Oberfläche	3,16	13,6	16,09
Prozente der Gesamtwärme für Leitung . . .	14,6	7,25	12,3
Prozente der Gesamtwärme für Strahlung . . .	85,4	86,4	87,7
Durch Strahlung abgegebene Wärme in W. E. st^{-1} pro Quadratmeter	81,9	188,3	415,9
Koeffizient C_1 nach dem Stefanschen Gesetz in W. E. st^{-1} m^{-2} $(^0 C.)^{-4}$	4,40	4,39	4,12
σ_1 in cal sec^{-1} cm^{-2} $(^0 C.)^{-4}$	$1{,}224 \cdot 10^{-12}$	$1{,}218 \cdot 10^{-12}$	$1{,}143 \cdot 10^{-12}$

2. Vergleich und Überblick über die gewonnenen Resultate.

Da bisher das Emissionsvermögen der Metalle und speziell der für die Heiztechnik in Frage kommenden Materialien nur in beschränktem Umfange und dann nur auf rein physikalischer Grundlage und bei einer bestimmten Temperatur (meist 100°) untersucht wurde, so ist ein Vergleich mit früheren Versuchsergebnissen nur schwer durchführbar, und überdies wegen der verschiedenartigen Oberflächenbeschaffenheit nicht immer stichhaltig. Hier seien nur die von Péclet erzielten Werte und die Resultate des Verfassers gegenübergestellt und zwar seien, wenn der Strahlungskoeffizient von Ruß = 1 gesetzt wird, die Relativwerte zusammengestellt.

Péclet		Verfasser	
Material	Koeffizient	Material	Koeffizient
Messing, poliert	0,065	Messing, matt	0,232
Kupfer, poliert	0,034	Kupfer, poliert	0,179
Zink	0,065	Zink	0,218
Schwarzblech, poliert . .	0,113	Schmiedeisen, poliert . .	0,299
Gewöhnliches Schwarzblech	0,691	Schmiedeisen, matt, oxydiert	0,991
Neues Gußeisen . . .	0,791	Gußeisen, oxydiert, rauh .	1,009
Mauerwerk	0,899	Mauerwerk	0,968

Das vom Verfasser angegebene Verfahren zur Bestimmung der Wärmestrahlung fester Körper in ihrer Abhängigkeit von deren Oberflächentemperatur hat ergeben, daß das nur für den absulot schwarzen Körper streng gültige Stefansche Gesetz, daß die Gesamtstrahlung der vierten Potenz seiner absoluten Temperatur proportional ist, mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit auch auf die in der Heiztechnik gebräuchlichen Materialien innerhalb des im folgenden angegebenen Temperaturbereichs angewendet werden darf. Aus der unter Formel 10) auf Seite 15 entwickelten Gleichung, welche die Gültigkeit des Stefanschen Gesetzes für den nicht schwarzen Körper voraussetzt, nämlich

$$S = F_1 \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}},$$

ergeben sich die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Werte, wenn in obiger Gleichung S die in der Stunde ausgestrahlte Wärmemenge in Wärmeeinheiten, F_1 die Oberfläche des strahlenden Körpers in Quadratmetern bzw. Quadratzentimetern, T_1 und T_2 die Oberflächentemperaturen des strahlenden und des bestrahlten Körpers, absolut gemessen, C_1 die Strahlungskonstante des strahlenden, C_2 die Strahlungskonstante des bestrahlten Körpers, C die Strahlungskonstante des absolut schwarzen Körpers = 4,61 W. E. m^{-2} st^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$ bzw. $\sigma_1 = 1{,}28\ 10^{-12}$ cal cm^{-2} sec^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$ bedeutet.

Versuchsreihe	Material	Oberfläche	Temperaturbereich in ^{0} C.	Strahlungskoeffizient	
				C_1 in W. E. m^{-2} st^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$	σ_1 in cal cm^{-2} sec^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$
I	Lampenruß	glatt	0—50	4,44	$1{,}23 \cdot 10^{-12}$
II	Messing	matt	50—350	1,03	0,29 „
III	Kupfer	schwach poliert	50—280	0,79	0,22 „
IV	Schmiedeisen	matt, oxydiert	20—360	4,40	1,22 „
V	Desgl.	hochpoliert	40—250	1,33	0,37 „
VI	Zink	matt	50—290	0,97	0,27 „
VII	Gußeisen	rauh, stark oxydiert	40—250	4,48	1,24 „
VIII	Kalkmörtel	rauh, weiß	10—90	4,30	1,19 „

Eine vergleichende graphische Übersicht über die durch Strahlung abgegebene Wärme bei verschiedenen Materialien und verschiedenen Oberflächentemperaturen ist in Fig. 8 gegeben.

Die Versuchsergebnisse bestätigen auch die von anderer Seite gefundene Regel,[1]) daß das Emissionvermögen der Metalle umgekehrt proportional ist deren elektrischen und thermischen Leitvermögen.

[1]) Siehe auch Wiedeburg, l. c. Hagen und Rubens, l. c.

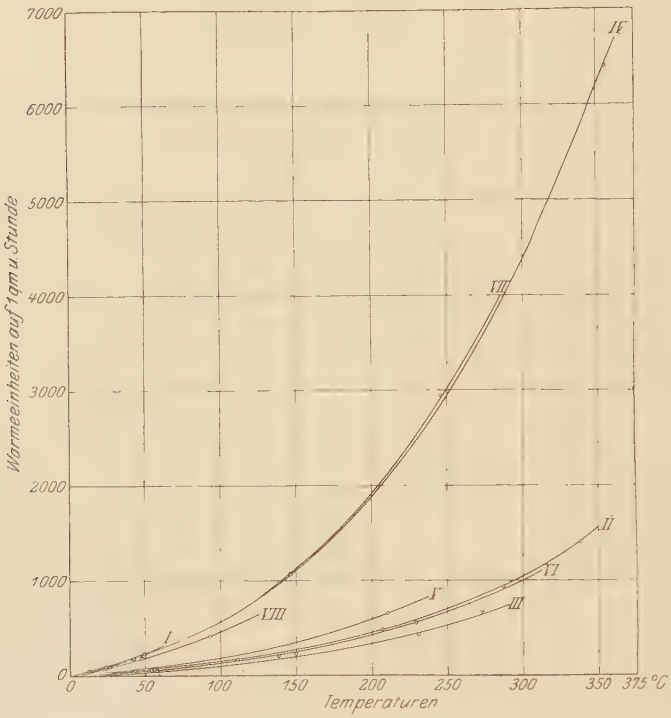


Fig. 8.

Durch Strahlung abgegebene Wärme bei verschiedenen Oberflächentemperaturen und bei verschiedenem Material.

Versuchsreihe	**I**	Lampenruß.
„	**II**	Messing.
„	**III**	Kupfer.
„	**IV**	Schmiedeisen matt.
„	**V**	„ blank.
„	**VI**	Zink.
„	**VII**	Gußeisen.
„	**VIII**	Mörtel-Mauerwerk.

II. Teil.

Gesamtwärmeabgabe oder Erkaltung.

Nachdem im I. Teil der vorliegenden Arbeit die Wärmestrahlung und ihre Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des strahlenden Körpers erörtert und ihrer absoluten Größe nach festgestellt worden ist, soll jetzt die Erkaltung oder die Gesamtwärmeabgabe durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Wärmeströmung an Heizkörpern und zwar an den in der Technik gebräuchlichsten Heizrohren bei ruhender Luft festgestellt und schließlich durch Subtraktion der jetzt berechenbaren Wärmestrahlung der durch Wärmeleitung und Wärmeströmung verursachte Restbetrag untersucht werden. Die angestellten Versuche bestimmen den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit, des Materials und des Rohrdurchmessers.

A. Geschichtlicher Rückblick.

Es mögen hier zunächst in Abschnitt A jene Gesetze der Wärmeabgabe eingehendere Besprechung finden, welche sich mit dem direkten Wärmeübergang von Metall an Luft beschäftigen, also diejenigen, welche die abgegebene Wärme in Beziehung bringen zu der Temperatur (meist Oberflächentemperatur) des Heizkörpers und der der umgebenden Luft, während bei Besprechung der technischen Untersuchungen im Abschnitt B auch solche kurz Erwähnung finden mögen, welche sich mit dem kombinierten Wärmedurchgang von Wärmeträger (Wasser, Dampf etc.) durch Rohrwand an Luft beschäftigen.

a) Erkaltungsgesetze.

Die ersten Angaben über die Gesetzmäßigkeit der Wärmeabgabe finden sich in Newtons[1]) Werken, denen wir das sog. Newtonsche Gesetz entnehmen. Dasselbe lautet

$$Q = h\,(T - \Theta)\,S \cdot \tau$$

und drückt aus, daß die in der Zeit τ von der Oberfläche S eines Körpers abgegebene Wärmemenge Q proportional ist der Differenz der Temperatur T des Körpers und der Temperatur Θ des umgebenden Mediums. Der Proportionalitätsfaktor h ist der sog. Koeffizient der äußeren Wärmeleitung, d. h. jene Wärmemenge, welche von einer Oberflächeneinheit in einer Zeit-

[1]) Newton, Neutoni opuscula mathematica II, 423. Lausannae et Genevae 1744.

einheit abgegeben wird, wenn im Laufe dieser Zeit die Differenz der Temperaturen $T - \Theta = 1$ Grad bleibt. Aus diesem Satz zieht dann Newton den Schluß, daß die Wärmeverluste in gleichen aufeinander folgenden Zeitintervallen eine fallende geometrische Reihe bilden müssen.[1])

Die Brauchbarkeit des Newtonschen Gesetzes wurde zuerst von Martine,[2]) dann von Kraft und Richmann[3]) angezweifelt, und insbesondere de la Roche[4]) hat gezeigt, daß dieses Gesetz bei Temperaturdifferenzen, welche über 80° hinausgehen, nicht mehr gültig ist. Auch Erxleben[5]) und Dalton[6]) verwerfen das Gesetz für hohe Temperaturdifferenzen und Chwolson[7]) beschränkt die praktische Anwendbarkeit des Gesetzes auf den Fall, daß die Temperaturdifferenz $T - \Theta$ nicht mehr als 5 Grad beträgt.

Veranlaßt durch die Unstimmigkeiten des Newtonschen Gesetzes haben dann Dulong und Petit[8]) ein neues Erkaltungsgesetz bei großen Temperaturdifferenzen zu ermitteln gesucht. Sie dehnten die im ersten Teil dieser Arbeit auf Seite 3 beschriebenen Untersuchungen an Thermometern im luftleeren Raum auch auf die Beobachtung der Erkaltungsgeschwindigkeit v in einem mit Gas erfüllten Raum aus und stellten dann bei verschiedenen Drücken für den durch die abkühlende Wirkung des Gases verursachten Betrag v_2 der Erkaltungsgeschwindigkeit den Ausdruck

$$v_2 = B p^c \cdot t^{1{,}232}$$

auf. Hier bedeutet p den Druck des Gases, c eine von der Art des Gases abhängende Konstante (für Luft = 0,45, für Wasserstoff = 0,30), t den Temperaturüberschuß des erwärmten Körpers über die Temperatur der Umgebung und B eine von der Art des Gases, sowie von der Masse, Form und Zusammensetzung des erkaltenden Körpers abhängige Größe. Es ergibt sich also dann nach Dulong-Petit für die Gesamtwärmeabgabe durch Addition des auf Seite 3 entwickelten, durch die Strahlung verursachten Wertes v_1 folgender Wert der Erkaltungsgeschwindigkeit:

$$v = v_1 + v_2 = m \cdot a^{\Theta}(a^t - 1) + B p^c t^{1{,}232},$$

worin, wie schon erwähnt, a eine konstante Zahl = 1,0077, Θ die Temperatur der Hülle und m eine von der Art der Oberfläche des Körpers abhängige Konstante, ferner t wieder den Temperaturüberschuß darstellt.

Da die von Dulong-Petit aufgestellten Gesetze, wie schon auf Seite 4 erwähnt, auf einer mangelhaften Kenntnis über die Wärmeleitfähigkeit der Gase aufgebaut sind und deren Brauchbarkeit von zahlreichen Forschern

---

[1]) Siehe auch R. Meves, Die empirischen Gesetze der Wärmetransmission. Gesundheitsingenieur **17**, 289, 1894.

[2]) Martine, Dissertations sur la chaleur etc., p. 72 sq.

[3]) Kraft und Richmann, Nov. Com. etc. Pet. I, 195.

[4]) de la Roche, Wüllner, Physik, Bd. 3, S. 247.

[5]) Erxleben, Nov. Com. Gotting. VIII, 74.

[6]) Dalton, Nouveau traité de la chimie philosophique.

[7]) Chwolson, Lehrbuch der Physik III, 309, 1905.

[8]) Dulong-Petit, Ann. de chim. et phys. **7**, 113 und 225, 1817.

wie De la Provostaye und Desains, Draper, Grätz, Violle, Stefan etc. bestritten wurde, kann obige Formel kein Naturgesetz ausdrücken, sondern nur als empirisch angesehen werden.

Auf den Gleichungen von Dulong-Petit hat Péclet seine Versuche begründet und ist mit Hilfe der auf Seite 4 besprochenen Versuchsanordnung zu dem Resultat gelangt:

$$M = R + A = 124{,}72 \cdot K \cdot a^{\Theta}(a^{t} - 1) + 0{,}552 \cdot K' \cdot t^{1{,}232}.$$

Hierin bedeutet M die gesamte, in einer gewissen Zeit von einer auf konstanter Temperatur gehaltenen Oberfläche ausgeströmte Wärmemenge; dieselbe setzt sich zusammen aus der durch Strahlung emitierten Wärme R und der durch Berührung mit der Luft transmittierten Wärme A. Der erste Summand R enthält die Faktoren: K eine von der Oberflächenbeschaffenheit abhängende Zahl, Θ die Temperatur der Umgebung, a eine konstante Zahl $= 1{,}0077$, t den Temperaturüberschuß der Temperatur des Körpers über die Temperatur der Umgebung. Der erste Summand ist im I. Teil vorliegender Arbeit auf Seite 6 besprochen und kritisiert. Der zweite Summand, die abgeleitete Wärme A, enthält die Faktoren K', eine von der Form und den Dimensionen des Körpers abhängende Zahl, und t den Temperaturüberschuß; er ist unabhängig von der Beschaffenheit der Körperoberfläche und von der Temperatur der Umgebung.

Für kugelförmige Körper gibt Péclet an: $K' = 1{,}778 + \frac{260{,}0}{D}$; für horizontale Zylinder $K' = 2{,}058 + \frac{76{,}4}{D}$; für ebene, senkrechte Flächen $K' = 1{,}764 + \frac{636}{\sqrt{h}}$ und für vertikale Zylinder:

$$K' = \left(0{,}726 + \frac{1{,}543}{\sqrt{D}}\right) \cdot \left(2{,}43 + \frac{0{,}8758}{\sqrt{L}}\right),$$

wobei D den Durchmesser, h die Höhe und L die Länge bedeutet, und als Einheiten Quadratmeter, Stunde und Kilogramm-Kalorie genommen sind. Für Temperaturüberschüsse von 25° bis 65° kann nach Péclet[1]) die Näherungsformel[2]) gesetzt werden:

$$M = W_1 + W_2 = s(1 + 0{,}0056\,(t_1 - t))\,(t_1 - t) + b\,(1 + 0{,}0075\,(t_1 - t))\,(t_1 - t),$$

worin W_1 Wärmeabgabe durch Strahlung in W. E. pro qm und Stunde,
W_2 „ „ „ Leitung „ „ „ „ „ „
s der Strahlungskoeffizient (auf S. 6 mit K bezeichnet),
t_1 die Oberflächentemperatur der strahlenden Fläche,
t die Temperatur der die strahlende Fläche umgebenden Luft,

[1]) Péclet, siehe deutsche Ausgabe von Dr. Hartmann, 1860, Bd. I, S. 302.

[2]) Recknagel, Kalender für Gesundheitstechniker 1907, S. 82 und 83. Ferner R. Mewes, l. c., S. 291.

b ein Koeffizient, abhängig von der Lebhaftigkeit des Ersatzes schon erwärmter Teile; für eingeschlossene Luft[1]) = 4, für freie Luft = 5, für lebhafte Luftbewegung[2]) = 6.

Wie schon auf Seite 7 bei der Kritik der Pécletschen Ergebnisse für die Wärmestrahlung erwähnt ist, liefern die Pécletschen Formeln zu kleine Werte für die Wärmeverluste.[3]) Man setzte daher für die Berührungskonstante K' größere Werte ein, indem man die Strahlungskoeffizienten beibehielt. Grashof[4]) weist darauf hin, daß Péclets Übergangskoeffizienten nach der Art seiner Versuchsanordnung eigentlich zusammengesetzte Durchgangskoeffizienten sind; denn dieselben beträfen den Übergang der Wärme aus beständig bewegtem Wasser durch eine dünne Metallwand hindurch an Luft und wenn auch der Übergangswiderstand beim Eintritt der Wärme aus dem Wasser in die Wand verhältnismäßig klein sowie ihre Leitung durch die Wand verhältnismäßig gut waren, so müsse doch immerhin die Temperatur der Wand an ihrer die Luft berührenden Oberfläche etwas niedriger sein als die von Péclet dafür gesetzte Wassertemperatur, somit dieser Übergangskoeffizient etwas zu klein gefunden worden sein.

Paul[5]) empfiehlt eine Prüfung der Pécletschen Werte namentlich für größere Temperaturdifferenzen und weist darauf hin, daß Péclets Formeln Werte ergeben, die kleiner sind als die aus unmittelbaren Versuchen sich ergebenden.

Berner[6]) konstatiert bei der Frage der Fortleitung des überhitzten Wasserdampfes die Tatsache, daß es außer Péclet keinem der anderen Forscher gelungen war, auch nur die allgemeine Beziehung zwischen Wärmeverlust und Temperaturgefälle sicher zu erkennen. Absolut genommen seien aber die Koeffizienten von Péclet auch nicht richtig. Man habe bisher angenommen, daß der Wärmeverlust nach Péclet um 25 % kleiner sei als in Wirklichkeit; der Fehler sei aber nach den jetzigen Versuchen bedeutend größer, mindestens 70 bis 80 vom Hundert. Hausbrand[7]) erwähnt, daß in Wirklichkeit heiße Flächen etwa 25 % mehr Wärme verlieren, als Péclets Formeln angeben und daß Eberle[8]) bei seinen Versuchen über den Wärme- und Spannungsverlust bei Fortleitung gesättigten und überhitzten Wasserdampfes Zahlen erhielt, die etwa 33 % größer sind als die von Péclet.

---

[1]) H. Valérius, Les applications de la chaleur, Bruxelles 1867, nach M. Ser (Cours de phys. industr. de l'école des arts et manufactures à Paris).

[2]) Péclet selbst bezeichnet (l. c.) mit b einen Koeffizienten K', der von der Form und den Dimensionen des Körpers abhängig ist.

[3]) S. auch Nusselt, Diss., l. c., und Hausbrand, S. 214, 1909.

[4]) Grashof, Theoretische Maschinenlehre, I. Bd. Leipzig 1875, S. 944.

[5]) F. Paul, Lehrbuch der Heizungs- und Lüftungstechnik. Wien 1885, S. 167.

[6]) O. Berner, Versuche mit überhitztem Dampf. Zeitschrift d. V. D. I., **49**, 1453, 1905.

[7]) F. Hausbrand, Verdampfen, Kondensieren und Kühlen. Berlin 1909, S. 202.

[8]) Ch. Eberle, Zeitschr. d. V. D. I., **51**, 484, 1908.

Weitere Formeln für das Gesetz der Erkaltung in ruhender Luft sind von Wilhelmy,[1]) Overbeck,[2]) ferner Lorenz[3]) und Tereschin[4]) angegeben worden, haben sich aber in der Praxis nicht weiter eingeführt. Die Formel von Lorenz lautet:

$$Q = s\,(T^4 - \Theta^4) + \lambda\,(T - \Theta)^{5/4},$$

worin T und Θ die Temperaturen des strahlenden und bestrahlten Körpers bedeuten und λ von der Form und den Abmessungen des erkaltenden Körpers abhängig ist. Nach demselben wäre also die von einem frei in einem gaserfüllten Raum sich abkühlenden Körper durch Leitung und Strömung abgegebene Wärme proportional der $^5/_4$ Potenz der Temperatur. Wagner[5]) fand, daß dies nicht richtig ist und daß in dieser Exponentialgleichung der Exponent nicht konstant ist und nicht $^5/_4$ beträgt; für den praktischen Gebrauch empfiehlt er die rein empirische Formel von der quadratischen Form $h \cdot F \cdot [(T - \Theta) + a\,(T - \Theta)^2]$, die für kleine Temperaturdifferenzen sich auf $h \cdot F \cdot (T - \Theta)$ reduzieren läßt, worin F die strahlende Fläche, h und a Konstante sind.

b) Technische Untersuchungen.

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt die Versuche von Dulong-Petit sowie Péclet und die verschiedenen Erkaltungsgesetze Erwähnung gefunden haben, sollen jetzt die in der Technik angewandten Verfahren zur Bestimmung der Wärmeabgabe von Rohren besprochen werden. Streng genommen gehören hieher nur jene Versuche, die sich mit der Wärmeabgabe in ihrer Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur beschäftigen, also keinen Wärmedurchgang behandeln. Da es aber bei Kenntnis des Wärmeübergangs von Wasser oder Dampf etc. an Metall leicht möglich ist, von der Dampf- oder Wassertemperatur auf die Oberflächentemperatur des Rohres zu schließen, und da es in der Praxis zuweilen angängig erscheint und hinreicht,[6]) für die Oberflächentemperatur die Wassertemperatur etc. zu setzen, so sollen auch jene Versuche aufgezählt werden, die sich mit der Wärmeabgabe in ihrer Abhängigkeit von Dampf- oder Wassertemperatur bei Rohren, also eigentlich mit einem Wärmedurchgang beschäftigen, wie er von Mollier[7]) näher beschrieben ist.

Es sei hier vorausgeschickt, daß bei den folgenden Resultaten unter der Wärmedurchgangszahl k immer diejenige Wärmemenge zu verstehen ist,

[1]) Wilhelmy, Pogg. Ann. **84**, 119, 1851.
[2]) Overbeck, Wied. Ann. **7**, 271, 1879.
[3]) Lorenz, Wied. Ann. **422**, 582, 1881.
[4]) Tereschin, l. c., p. 147.
[5]) Wagner, Dissertation. Zürich 1902.
[6]) Siehe O. Berner, Zeitschr. d. V. D. I., **48**, 475, 1904. Ch. Eberle, Zeitschr. d. V. D. I., **52**, 486, 1908. Beide machen darauf aufmerksam, daß der Fehler gering ist, wenn man an die Stelle der Oberflächentemperatur die Temperatur des gesättigten Dampfes setzt, daß dies aber bei überhitztem Dampf nicht zulässig ist.
[7]) Mollier, Zeitschr. d. V. D. I. **41**, S. 153, 1897.

welche, in Kilogramm-Kalorien gemessen, durch ein Quadratmeter des untersuchten Materials bei einer Temperaturdifferenz von 1 Grad C. zwischen Wärmeträger und Raumtemperatur hindurchgeht.

An die Spitze seien die Versuche von Joule[1]) gestellt, wenn sie sich auch mehr mit dem Einfluß der Luftgeschwindigkeit beschäftigen. Sein Versuchsapparat bestand im wesentlichen aus zwei senkrechten, gleichachsigen Rohren, deren Inneres als Dampfrohr dient, während der ringförmige Querschnitt von Luft durchströmt wird. Joule fand $k = 16 \cdot \sqrt{v}$, wenn v die Luftgeschwindigkeit ist.

Ser[2]) hat den Wärmeübergang aus siedendem Wasser in strömende Luft und zwar ebenfalls an koaxialen Rohren untersucht. Er findet, daß die Wärmedurchgangszahl bei gleicher Geschwindigkeit mit dem Rohrdurchmesser wächst und proportional ist der Quadratwurzel aus der Geschwindigkeit der Luft. In einem Fall $k = 11{,}3 \cdot \sqrt{v}$, in einem anderen Fall $k = 16 \cdot \sqrt{v}$.

Käuffer[3]) gibt auf Grund von Péclets Versuchen und weiteren eigenen Beobachtungen für die Wärmedurchgangszahl von Wasser an Luft $k = 12$.

Fischer[4]) hat gußeiserne, von Dampf durchströmte Rohre von 2490 mm Länge, 80 mm Weite und 100 mm äußerem Durchmesser senkrecht in einem Schacht aufgestellt, der aus zwei ineinander gesteckten Bretterkästen bestand, deren Hohlraum mit Heu ausgefüllt war. Er vergleicht die Wärmeabgabe von glatten Rohren mit der von Rippenrohren. Er findet für den Wärmeübergang von Dampf durch ein glattes Gußeisenrohr an Luft $k = 18{,}1$ und erwähnt, daß Redtenbacher $k = 12$ feststellt, aber vermutlich an horizontalen Rohren. Fischer schreibt diese Differenz dem Umstand zu, daß er die Lufttemperatur im Schacht 70 mm vom Rohr entfernt mißt, während Redtenbacher die Temperatur des zu erwärmenden Raumes einsetzt. In diesem Falle würde Fischer $k = 17$ setzen.

Ordway[5]) hat an einem Dampfleitungsrohr von 50 mm lichter Weite und 5 mm Wandstärke bei 304,8 mm Länge, einer Dampfspannung von 4 Atmosphären absolut, einer Innentemperatur von 105° C. und einer Außentemperatur von 15° C. aus dem Dampfkondensat einen Wärmeverlust von 1594 Kal., somit $k = 17{,}7$ berechnet.

Gutermuth[6]) stellte an gußeisernen Rohren von 150/174 mm Durchmesser und 3000 mm Länge, bei Dampfspannungen von 2,3 bis 2,6 atm., bei Dampftemperaturen von 137—140° und bei 13,5 bis 23,5° Außen-

[1]) Joule, On the surface-condensation of superheated steam (s. a. Mollier, l. c.). Phil. Transactions of the Royal Society London **151**, 133, 1861.

[2]) Ser, Physique industrielle, S. 147; siehe auch Mollier, l. c.

[3]) P. Käuffer, Wärmende Flächen, Heizflächen. Zeitschr. „Der Rohrleger", Nr. 22, S. 336, 1876.

[4]) Fischer, Über einige neuere Beobachtungen über die Wärmeabgabe von Heizflächen an Luft. Dinglers Polytechn. Journal, **228**, 1, 1878.

[5]) John M. Ordway, Boston Report 14, F. W. Ripley Prints Congress Str. No. 138, Institution of Technology 1883; siehe auch Hausbrand, 1909, l. c.

[6]) Gutermuth, Zeitschr. d. V. D. I. **33**, 653, 1887; s. a. Hausbrand, l. c.

temperatur Versuche an, welche durchschnittlich 1672 Cal. abgegebene Wärme, somit $k = 14{,}0$ brachten.

Pasquay[1]) hat im Jahre 1887 an einem aus zwei gußeisernen Rohren von 1,873 m Länge und 0,170 m äußerem Durchmesser bestehenden Versuchsapparat zur Prüfung von Wärmeisolierstoffen bei einem Dampfdruck von 5, 2,4, 2,1, 5 Atmosphären, einer Lufttemperatur von 6—15°, 23°, 16—17 C.°; einen Durchgangskoeffizienten $k = 14{,}0$, 12,8, 12,9, 13,5 gefunden.

Die vom Magdeburger Dampfkessel-Revisions-Verein[2]) angestellten Versuche an einer gußeisernen Leitung von 150 mm l. W. bei 13 mm Wandstärke ergaben bei 4,2, 3,2, 1,2 Atmosphären Dampfdruck, 22, 21, 20° C. Lufttemperatur einen Wert $k = 17{,}1$, 16,1, 15,4.

Haacke[3]) benützte bei Untersuchung von Isoliermitteln einen Versuchsapparat, der aus drei 1830 mm langen, gußeisernen Rohren von 125 mm l. D. bestand. Das unbekleidete Rohr ergab bei einem Dampfüberdruck von 4,2 Atmosphären und einer mittleren Lufttemperatur von 25° C. eine Kondensation von 3,25 kg, damit einen Durchgangskoeffizienten $k = 12{,}8$.

Rußner[4]) hat an schmiedeisernen Rohren die wärmeisolierende Wirkung von Luftmänteln studiert und kommt zu dem Resultat, daß ein schmiedeisernes nacktes Rohr von 88,5 mm lichtem Durchmesser bei 6500 mm Länge, bei 99,3° Dampf- und 20,0° Lufttemperatur einen Wärmeverlust von 900 Kal., bei der gleichen Dampf-, jedoch 10,8° Lufttemperatur, einen solchen von 1058 W.E. erleidet, woraus sich ein k von 12,6 bzw. 12,1 ergibt.

Im Jahre 1895 hat Müller[5]) an gußeisernen Rohren von 159 mm äußerem Durchmesser und 8008 mm Länge bei 1,2; 3,6; 5,5 Atmosphären Dampfspannung und 106,6; 140,1; 154,6° Dampftemperatur, 36,6; 34,8; 42,5° Lufttemperatur einen Wärmeverlust von 871; 1538; 1663 W.E. m^{-2} st^{-1} und damit $k = 12{,}4$; 14,6; 14,8 erhalten.

Von Bedeutung sind die Mitteilungen, welche Rietschel[6]) auf der Versammlung von Heizungs- und Lüftungstechnikern zu Berlin am 3. September 1896 über das Ergebnis des Preisausschreibens, betreffend Wärmeabgabe von Heizkörpern, gab; er stellte an Hand umfangreicher Versuche folgendes fest: bei den Horizontalröhren wird die Wärmeabgabe mit wachsendem $\frac{D}{d}$, d. i. dem Verhältnis des äußeren Durchmessers zum inneren, kleiner, bei senkrechten Rohren nimmt sie mit wachsendem Durchmesser zu; der Einfluß der Höhe ist bemerkbar; über den Einfluß der Farbe ist zu

---

[1]) Pasquay, Zeitschr. d. V. D. I., **31**, Nr. 52 und 53, 1887; ferner Pasquay, Wärmeschutz im Dampfbetrieb, Wasselnheim 1900; u. a. Russell, l. c. (Gesundheitsingenieur, S. 590, 1904).

[2]) M. R. V., Gesundheitsingenieur, 18. Oktober 1888, S. 678; s. a. Russell, Gesundheitsingenieur, l. c.

[3]) Albert Haacke, Kieselguhr Warf, London, Engineering, 24. Mai 1889; s. a. Russell, Gesundheitsingenieur 1904, l. c.

[4]) J. Rußner, Jahresbericht der Techn. Staatslehranstalt zu Chemnitz. Ostern 1891. Kondensation in Dampfleitungen und Wärmeschutzmittel.

[5]) P. Müller, Agent von Grünzweig & Hartmann, Broschüre, 24. August 1895. Zeitschr. d. V. D. I., **39**, 53, 1895; siehe auch Hausbrand, Verd. Kond. u. Kühlen, l. c.

[6]) H. Rietschel, Gesundheitsingenieur, **19**, 327, 1896.

bemerken, daß man durch Auswahl der richtigen Farbe eine kleine Erhöhung des Koeffizienten herbeiführen kann, dieselbe ist jedoch nicht von Bedeutung.

Im Jahre 1899 hat Zulauf[1]) mit einem Versuchsapparat für Wärmeisolierstoffe an einem gußeisernen Rohr von 180 mm l. D. und 4914 mm Länge bei 10,3 bis 10,7 Atmosphären Dampfüberdruck und einer mittleren Lufttemperatur von 15° C. eine mittlere Kondensation von 4,61 kg, daraus $k = 14{,}4$ bestimmt.

Barrus[2]) fand an einer Versuchsleitung von 2 Zoll bei 10,5 Atmosphären $k = 16{,}4$; bei 10 Zoll, 10,5 Atmosphären $k = 16{,}0$; also hier bei größerem Durchmesser kleinere Wärmeabgabe.

Versuche von Hudson Beare[3]) (und Capper) ergaben an einem 2707 mm langen Versuchsrohr mit einem mittleren Durchmesser von 90 mm bei Dampfdrücken von 6,0; 4,1; 0,2 Atmosphären und bei 20°; 17°; 18° Lufttemperatur eine Durchgangszahl $k = 14{,}6$; 14,0; 11,1.

Spätere mit dem gleichen Apparat für Wärmeisolierstoffe von Bolam und Grieve[4]) im Fulton Engineering Laboratory, Edinburgh University unternommene Versuche ergaben folgende Werte:

Dampfüberdruck	7,0	4,9	2,8	1,7	Atm.
Lufttemperatur	18,5	20,0	20,3	20,7°	C.
Dampfkondensat	4,79	4,295	3,18	2,25	kg st^{-1}
Durchgangskoeffizient	15,4	15,3	13,2	10,7	W. E.

In seinem Leitfaden zur Berechnung von Heizungs- und Lüftungsanlagen macht Rietschel[5]) über die pro Stunde durch 1 qm Heizfläche von Wasser, Dampf oder Luft an Luft übertragene Wärmemenge auf Grund eingehender Sonderversuche folgende Angaben:

I. Wärmeübertragungszahl k von Wasser an Luft:

Einfaches vertikales oder horizontales Rohr	Temperaturdifferenzen zwischen mittlerer Wassertemperatur und Temperatur der zuströmenden Luft					
	unter 40° C.	40 bis 50°	50 bis 60°	60 bis 70°	70 bis 80°	über 80°
bis 33 mm äuß. Durchm.	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	12,5
über 33— 60 „ „ „	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
„ 60—100 „ „ „	8,5	9,5	10,0	10,5	10,5	10,5
„ 100—150 „ „ „	8,0	9,0	9,5	9,5	9,5	9,5
mehr als 150 „ „ „	8,0	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5

[1]) I. Zulauf, St. Petersburg, Januar bis Mai 1899; siehe auch Russell, l. c.

[2]) Geo H. Barrus, Relative efficiency of non conductig compositions, London E. Tabelle von A. S. E. Ackermann, veröffentlicht von Snowdon, Sons & Co. Ltd., Millwall; siehe auch Russell, l. c. und Practical Engineer, 17. Januar 1902, Engineering Nr. 1912, August 1902.

[3]) T. Hudson Beare, Engineering **22**, 1901.

[4]) W. N. Bolam and T. Grieve, Engineering **76**, 1903; siehe auch Russell, l. c.

[5]) H. Rietschel, Leitfaden zum Berechnen und Entwerfen von Heiz- und Lüftungsanlagen. Berlin 1902.

II. Wärmeübertragungszahl k von Dampf an Luft:

Einfaches horizontales Rohr

bis 33 mm äußerer Durchmesser	13,0
über 33 mm bis 100 mm	12,0
mehr als 100 mm äußerer Durchmesser . . .	11,5

Einfaches vertikales Rohr

a) Niederdruckdampfheizung:

bis 33 mm äußerer Durchmesser	13,5
über 33 mm bis 100 mm	12,5
mehr als 100 mm äußerer Durchmesser . . .	12,0

b) Hochdruckdampfheizung:

bis 33 mm äußerer Durchmesser	14,0
über 33 mm bis 100 mm	13,0
mehr als 100 mm äußerer Durchmesser . . .	12,5

Im Jahre 1904 hat Russell[1]) eine Zusammenstellung gebracht über die Versuche von Barrus, Zulauf, Pasquay, Hudson Beare, Bolam und Grieve, Magdeburg u. s. w. und weist an Hand einer Tabelle und eines zugehörigen Diagramms nach, daß der Koeffizient k innerhalb gewisser Grenzen mit dem Temperaturunterschied zwischen Dampf und Luft gleichmäßig wächst und zwar um ca. 0,072 für jeden Grad Steigerung desselben; ferner daß mit zunehmendem Rohrdurchmesser der Koeffizient k abnimmt.

Pasquay[2]) hat neuerdings an seinem Versuchsapparat für Wärmeisolierstoffe den Einfluß des Durchmessers liegender Zylinder gezeigt und mit einem wagrechten eisernen Dampfrohr von 1 qm Oberfläche bei 100° Dampf- und 15° Außentemperatur folgende Zahlen erhalten:

Durchmesser:	300	200	100	60	20 mm
Wärmeverlust:	731	754	805	870	1208 W.E. $st^{-1}\,m^{-1}$
Wärmedurchgangszahl k:	8,6	8,9	9,5	10,2	14,2 W.E. $st^{-1}\,m^{-1}\,{}^{0}C.^{-1}$

Zur Kritik aller bisher beschriebenen Verfahren, bei denen der Wärmeverlust durch Kondensatbestimmung festgelegt wurde, sei erwähnt, daß dieselben alle den großen Nachteil aufweisen, daß eine absolut genaue Bestimmung der abgegebenen Wärme wegen des immer ins Versuchsrohr mitgerissenen Wassers[3]) nicht möglich ist, ein Umstand, auf den auch

---

[1]) H. Russell, London. Ein Beitrag zur Frage der Wärmekoeffizienten in der Praxis. Gesundheitsingenieur **27**, 589, 1904.

[2]) Der Versuchsapparat von Pasquay wurde zuerst auf der Frankfurter Patentausstellung im Jahre 1881 gezeigt. Siehe auch Ch. Pasquay, Wärmeschutz und Dampfbetrieb. Wasselnheim 1905.

[3]) Eberle, a. a. O. Ausführliche Untersuchungen über die Feuchtigkeit des Dampfes in Rohrleitungen hat A. Sendtner im Laboratorium für technische Physik der Technischen Hochschule München ausgeführt, deren Resultate in einer demnächst erscheinenden Dissertation veröffentlicht werden.

Gutermuth,[1]) Rietschel,[2]) Benisch,[3]) Nusselt[4]) u. a. mehr hingewiesen haben.

Infolgedessen sind in neuerer Zeit bei Untersuchung von Wärmeisolierstoffen Versuche unternommen worden, bei denen die betreffenden Rohre durch eingebaute elektrische Heizkörper elektrisch erwärmt waren und somit aus der zugeführten elektrischen Energie der Wärmeverlust genau festgestellt werden konnte. Zuerst hat Boyer-Guillon[5]) den Einfluß verschiedener Umhüllungen an einem 1020 mm langen Kupferrohr von 70 mm äußerem Durchmesser und 10 mm Wandstärke bestimmt. Der im Innern des Rohres untergebrachte Heizwiderstand bestand aus einem Widerstandsdraht von ca. 10 Ohm, welcher auf ein mit Asbestpapier belegtes Stahlrohr aufgewunden war. In die Wandstärke des Rohres selbst hat man mit Quecksilber gefüllte Höhlungen angebracht, in welche zur Bestimmung der Oberflächentemperatur Quecksilberthermometer tauchten. Ein vorgeschalteter Rheostat erlaubte eine Regulierung der Stromintensität, die einer städtischen Leitung von 110 Volt entnommen war. Der Dauerzustand trat nach einer Nacht oder wenigstens 4 bis 5 Stunden ein. Mit einem nackten, stark oxydierten Kupferrohr von obigen Dimensionen wurde folgendes Ergebnis gewonnen:

Temperaturdifferenz zwischen Rohr- und Saaltemperatur $= t$	Wärmeverlust in kg-Kal. pro Stunde	Berechneter Wärmeverlust nach untenstehender Formel
50		82,2
63,2	114,8	
83,2	163,4	
100		209,7
102,4	208,5	
121,4	264,8	
150		382,5
150,9	356,0	
175,5	501,6	
200		600,7
201,4	601,2	
248,6	897,7	
250		864,2

Zur rechnerischen Ermittelung des Wärmeverlustes dieses unbekleideten Rohrs wird die Formel empfohlen:

$$Q = 1{,}1905 \cdot t + 0{,}009065 \cdot t^2,$$

worin t der Temperaturüberschuß ist. Die hieraus berechneten Werte stehen

---

[1]) Gutermuth, Zeitschr. d. V. D. I., **31**, S. 696, 1887.

[2]) Rietschel, Zeitschr. d. V. D. I., **46**, S. 959, 1902.

[3]) A. Benisch und A. Andersen, Zeitschr. d. V. D. I., **50**, 1655, 1906.

[4]) Nusselt, l. c.

[5]) M. Boyer-Guillon et M. M. Auclair et Laedlein, Manière de mesurer les pertes de chaleur des enveloppes calorifuges. Bulletin du laboratoire d'essais du conservatoire des arts et métiers, No. 7, Tome 1, 1905—06. Paris.

in der 3. Reihe obiger Tabelle. Auf die mit umhüllten Rohren erzielten Resultate und die denselben zu Grunde gelegte Anordnung sei hier nicht näher eingegangen.

Dadurch, daß die Forscher die an den Rohrenden abgegebene Wärme, welche unter anderen Verhältnissen emittiert wird, als die in der Mitte, mithereinbeziehen, behaften sie ihre Bestimmung des Wärmeverlustes mit einer wenn auch nicht bedeutenden Ungenauigkeit, wie sich aus den unten S. 63 ff. mitgeteilten Versuchen des Verfassers ergibt.[1])

Benisch und Andersen[2]) haben ein ähnliches Verfahren wie Boyer-Guillon ebenfalls zu rein vergleichenden kalorimetrischen Untersuchungen von Wärmeschutzmitteln angewandt. Als Versuchskörper dienten schmiedeiserne Normalrohre von 94,5 mm Innen- und 102,0 mm Außendurchmesser bei 1000 mm Länge, somit 0,3367 qm Oberfläche, deren Inneres durch zwei elektrisch erhitzte Konstantanbänder mittelst Wechselstrom geheizt wird. Die Innentemperatur würde mit Quecksilberthermometern gemessen, während die Oberflächentemperatur der Isolierschicht durch Thermoelemente bestimmt würde. Für mehrere Heizungen wurde dann der zeitliche Temperaturverlauf im Innern des Rohres von Beginn der Heizung bis zum Dauerzustand beobachtet. Beim Rohr ohne Isolierung wurde nach 10 Stunden bei einem Wattverbrauch von 100, 200, 400, 1600, 2000 eine Temperatur in °C. von 77, 114, 174, 323, 400 erreicht. Eine weitere Tabelle gibt Aufschluß über die Wärmeabgabe. Es ergaben sich bei den Temperaturen 126°, 150°, 200° die Wärmeverluste 126, 168, 458 W.E. pro Stunde.

Diese Methode ist eingehend von Pasquay[2]) und Nusselt[3]) kritisiert worden.

In jüngster Zeit sind von Eberle[4]) in großem Maßstab ausgeführte Versuche über den Wärme- und Spannungsverlust bei der Fortleitung gesättigten und überhitzten Wasserdampfes unternommen worden. Die Versuche wurden angestellt an schmiedeisernen Rohrleitungen (horizontal) von 70/76 mm Durchmesser bei 49,5 m Länge und von 150/160 mm Durchmesser bei 26,2 m Länge mit Dampf von 1—12 Atmosphären bei 100 bis 400° Temperatur. Zur Messung der Lufttemperatur fanden Quecksilberthermometer Verwendung. Die Dampftemperatur wurde im allgemeinen mit Quecksilberthermometern ermittelt, die Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt und die Temperatur der Rohrwand wurde mit Thermoelementen (siehe oben S. 23) festgestellt.

Dabei wurde u. a. konstatiert, daß bei gesättigtem Dampf die Temperatur der Rohrwand nur wenig (0,5—1°) von der des Dampfes verschieden, bei überhitztem Dampf jedoch je nach dessen Geschwindigkeit 30—60°

[1]) Über die Oberflächentemperaturmessung mit Quecksilberthermometern hat sich schon Wagner, a. a. O. und Nusselt, a. a. O. ausgesprochen.

[2]) Benisch und Andersen, Zeitschr. d. V. D. I., **50**, S. 1655, 1906.

[3]) H. Pasquay, Zeitschr. d. V. D. I., **50**, S. 2046, 1906.

[4]) W. Nusselt, Diss. München 1907, S. 13.

[5]) Ch. Eberle, Zeitschr. d. V. D. I., **52**, S. 484 ff., 1908.

geringer ist als die des Dampfes. Ferner ergab sich entgegen allen früheren Untersuchungen, daß der Rohrdurchmesser auf die Wärmeabgabe nicht von Einfluß ist.[1])

Zur Berechnung des Wärmeübergangs von der Rohrleitung an die Luft bedient sich Eberle der Formel:

$$k = k' + \frac{c}{t_w - t_l} \cdot \left\{ \left(\frac{t_w + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_l + 273}{100} \right)^4 \right\},$$

worin k' = Durchgangskoeffizient für Berührung, t_w = Wandtemperatur, t_l = Lufttemperatur ist, während k den Gesamtübergangskoeffizienten darstellt.[2]) Nun setzt Eberle für k die aus seinen Versuchsergebnissen erhaltenen Werte ein, wobei er für die ebenfalls gemessene Wandtemperatur die Dampftemperatur setzt, nimmt für c den Wert 4 (der nach obigen Messungen (s. S. 35) nicht zutrifft), rechnet dann k' aus obiger Gleichung aus und findet, daß k' ebenso wie bei Péclet mit wachsender Temperatur zunimmt. Hieraus zieht er dann den Schluß, daß das Stefansche Gesetz erfüllt sei. Diesem Schluß ist jedoch entgegenzuhalten, daß die Versuche von Eberle doch nur beweisen, daß man bei Anwendung des Stefanschen Strahlungsgesetzes für k' eine auch anderweitig gefundene Gesetzmäßigkeit erhält und somit mit früheren Erfahrungstatsachen nicht in Widerspruch kommt. Bei einer strengen Beweisführung für die Gültigkeit des Stefanschen Gesetzes müßte erstens die obige Gleichung für k so umgeformt werden, daß entsprechend der Gleichung 10) (S. 15) die drei Strahlungskonstanten C_1, C_2 und C in ihr enthalten sind, ferner müßte bei Beibehaltung von nur einem Koeffizienten c bewiesen werden, daß derselbe konstant und gleich 4 ist, und endlich müßte festgestellt werden, daß in der Gleichung für k der Exponent der absoluten Temperaturen den Wert 4 besitzt (etwa ähnlich wie im I. Teil, S. 30 u. ff.).

Es mögen nun noch einige von Eberles Zahlen für den Wärmeverlust einer nackten Rohrleitung bei ruhendem Wasserdampf angegeben werden.

Rohrdurchmesser licht in mm	Dampfdruck in kg/cm² absolut	Dampftemperatur in ⁰ C.	Mittlere Lufttemperatur in ⁰ C.	Temperaturunterschied in ⁰ C.	Wärmeverlust pro Stunde für 1 qm Rohrleitung in W. E.		
					ausschließl. Flüss. Wärme	pro 1⁰ C. Temper.-Differenz = k	k'
70,0	3,17	134,7	16,1	118,6	1556	13,1	6,15
	6,59	161,6	17,2	144,4	2043	14,1	6,19
	13,04	190,7	21,7	169,0	2608	15,4	6,27
130,0	3,33	136,3	25,7	110,6	1432	13,0	5,74
	6,72	162,4	30,2	132,2	1889	14,3	5,89
	13,06	190,8	35,4	155,4	2451	15,8	6,24

[1]) Vgl. auch die gegenteiligen Beobachtungen des Verfassers, S. 64 ff.

[2]) D. i. die in einer Stunde vom Quadratmeter pro 1 Grad Temperaturdifferenz durch Leitung und Strahlung und Konvektion abgegebene Wärme in W. E.

Damit sind die wichtigsten Verfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustes von Rohrleitungen erwähnt. In Anbetracht der erwähnten Mängel erschien es gerechtfertigt, an Hand einer neuen Versuchsanordnung, die sich die früheren Erfahrungen zunutze machte, Versuche über die Wärmeabgabe von Heizrohren bei verschiedenen Oberflächentemperaturen anzustellen. Es sei nun übergegangen auf diese Versuche des Verfassers, welche an elektrisch geheizten Rohren den Wärmeverlust bestimmen und die Oberflächentemperatur mit Thermoelementen messen.

B. Versuche des Verfassers.

a) Rechnerisches Verfahren.

Wie schon eingangs erwähnt, zerfällt der Vorgang der Wärmeabgabe in drei Teilerscheinungen, nämlich in die Wärmestrahlung, in die Wärmeleitung der Luft und in die Wärmeströmung. Die beiden letzten Vorgänge werden veranlaßt durch die Berührung des warmen Körpers mit der Luft. Um ihre Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Heizkörper und Raumtemperatur, Rohrdurchmesser etc. kennen zu lernen, ist es nötig, ihren absoluten Anteil an der Erkaltung festzustellen. Dies geschieht dadurch, daß man zunächst die Gesamtwärmeabgabe S feststellt, welche bei den hier elektrisch erwärmten Rohren äußerst genau aus der zugeführten elektrischen Energie errechnet werden kann und dadurch, daß man außerdem die Oberflächentemperatur und die Raumtemperatur bestimmt, was hier mit Thermoelementen geschah. Von diesem Gesamtwärmeverlust S ist dann die durch Strahlung verlorene Wärme S_1 in Abzug zu bringen. Nach der im ersten Teil der Abhandlung entwickelten Formel 10) berechnet sich dieselbe zu

$$S_1 = F \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}}$$

unter Annahme der Gültigkeit des Stefanschen Gesetzes. Hierin bedeutet S_1 die vom Heizrohr pro Stunde ausgestrahlte Wärmemenge, F die Oberfläche des strahlenden Körpers, T_1 ist die absolute Temperatur des strahlenden Körpers, also des Heizrohres, T_2 die absolute Temperatur des bestrahlten Körpers, also der Wand, C_1 ist der Strahlungskoeffizient des Heizrohrmaterials, C_2 der des Mauerwerks und C der des absolut schwarzen Körpers $= 4{,}61$ W. E. m^{-2} st^{-1} $(^0\,C.)^{-4}$.

Es sei hier darauf hingewiesen, daß bei der Auswertung der durch Strahlung verlorenen Wärme statt der Temperatur des bestrahlten Körpers (also der Temperatur der Wandoberfläche) die Temperatur der den Heizkörper umgebenden Luft eingesetzt wurde. Der dadurch begangene Fehler war, wie Kontrollversuche zeigten, nicht groß, da die Wände des Versuchsraums bei den monatelang durchgeführten Versuchsreihen ebenfalls durch-

wärmt waren und der Unterschied zwischen Wand- und Lufttemperatur daher nur gering war.

Der nach Abzug der ausgestrahlten Wärme S_1 bleibende Rest ist dann die durch Berührung mit der Luft abgegebene Wärmemenge S_2. Dieselbe ist abhängig von dem Überschuß der Temperatur t_1 des Körpers über die der Umgebung t_2, ferner von der Form und den Abmessungen des Heizkörpers. Es läßt sich dann

$$S_2 = k_2 F \cdot (t_1 - t_2)$$

schreiben, worin k_2 der durch Leitung und Strömung bedingte Wärmeübergangskoeffizient in Wärmeeinheiten pro Quadratmeter und Stunde ist. Die Gesamtwärmeabgabe eines Heizrohres kann dann gesetzt werden:

$$S = S_1 + S_2 = F \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}} + k_2 \cdot (t_1 - t_2) \right\}.$$

In dieser Gleichung kann man mit Hilfe der im I. Teil der Abhandlung bestimmten Werte von C_1 und C_2 der erste Summand berechnet und dann bei verändertem Durchmesser und bei verschiedenen Temperaturdifferenzen die Veränderlichkeit des Faktors k_2 im zweiten Summanden festgestellt werden.

Es sei ausdrücklich hervorgehoben, daß die in der letzten Gleichung auftretende Größe k_2 diejenige Wärmemenge bezeichnet, die allein durch Leitung und Konvektion von der Flächeneinheit des heißen Körpers an die umgebende Luft bei einer Temperaturdifferenz von 1° C. übertragen wird. Sie ist wesentlich verschieden von dem in der Heiztechnik auch gebräuchlichen Koeffizienten, der mit K bezeichnet sein möge und der diejenige Wärmemenge bedeutet, welche bei den gleichen Verhältnissen durch Strahlung, Leitung und Konvektion insgesamt abgegeben wird. Die so abgegebene Wärmemenge ist dann:

$$S = F \cdot K \cdot (t_1 - t_2),$$

wo F die Fläche des heißen Körpers, t_1 seine Oberflächentemperatur und t_2 die Temperatur der umgebenden Luft bedeutet.

Im letzteren Fall wird die von einem Körper abgegebene Wärmemenge durch die eine Größe K berechnet, während bei der oben angeführten Zerlegung in Strahlung, Leitung und Konvektion die Koeffizienten C, C_1, C_2 und k_2 zur Berechnung nötig sind. Da die Strahlung allein von der Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit, dagegen Leitung und Konvektion zum Teil auch noch vom Bewegungszustand der Luft abhängig sind, so ist von vornherein vorauszusehen, daß es nicht möglich sein wird, die verschiedenen Vorgänge der Wärmeabgabe durch die Gesetzmäßigkeit eines einzigen Faktors zusammenzufassen. Es ist vielmehr die schon erwähnte Zerlegung vorzunehmen.

b) Versuchsanordnung.

1. Versuchsrohre.

Die untersuchten Rohre hatten eine Länge von 3000 mm, die deshalb so groß gewählt wurde, weil sich hier der Einfluß der Bodenflächen ausschalten läßt, wie die Auswertung der Versuche S. 63 zeigt. Der äußere Durchmesser betrug bei den zur Untersuchung des Einflusses von Material- und Oberflächenbeschaffenheit verwendeten vier Rohren:

a) bei einem schmiedeisernen Rohr, sog. Verbandsrohr, nach den Normalien des Verbandes Deutscher Zentralheizungsindustrieller, = 59 mm, bei einem Innendurchmesser von $49^1/_2$ mm, somit einer Wandstärke von 4,75 mm (nomineller Rohrdurchmesser 2 Zoll),

b) bei einem von der Firma Heckmann & Co., Aschaffenburg, eigens hergestellten Kupferrohr, ebenfalls = 59 mm, Wandstärke 5 mm,

c) bei einem im Vorrat der Firma Emhardt & Auer, München vorhandenen Gußeisenrohr = 59 mm mit einer Wandstärke von 7 mm.

Zur Bestimmung des Einflusses der Durchmesser fanden schmiedeiserne Rohre, wiederum sog. Verbandsmuffenrohre, Verwendung, nach den Normalien des Verbandes D. Z. I. mit folgenden Abmessungen:

Bestell-Nr.	Innendurchmesser engl.	Innendurchmesser mm ca.	äußerer Durchmesser	Wandstärke ca.
2	$^1/_2$	14,5	20,5	2,95
4	1	25,5	33	3,75
6	$1^1/_2$	39,5	48	4,30
8	2	49,5	59	4,75
26	$2^1/_2$	65,5	76	5,25
—	3	79	89	5,00

Diese Rohre wurden in dem 2,1 m hohen Versuchsraum in einer Höhe von 1,15 m über dem Fußboden horizontal aufgehängt und zwar an zwei je 0,75 m vom Rohrende entfernten Stahldrahtschleifen. Es ging so ein ganz minimaler Betrag an Wärme verloren, der durch die Drähte abgeleitet wurde, jedoch nicht in Betracht kam, weil, wie auf S. 63 besprochen wird, nur ein bestimmter mittlerer Teil des Rohres zur Wärmeverlustberechnung herangezogen wird. An ihren Enden waren die Rohre mit Kappen von gleicher Wandstärke wie die Rohre abgeschlossen. Diese Kappen wurden mit angelöteten Blechringen versehen (s. Fig. 9), konnten auf die Rohrenden luftdicht aufgesteckt werden und mit Speckstein oder Porzellan isolierte Löcher erhalten, welche die Stromzuführungsdrähte für den Heizkörper aufzunehmen hatten.

Im Rohrinnern befand sich der Heizkörper, welcher aus einem Messingrohr bestand, das zunächst mit Asbestpapier umhüllt und dann mit Widerstandsplätt, d. i. flachgewalztem Nickelindraht, umwickelt war. Der äußere Durchmesser des Messingrohrs war im allgemeinen 10 mm kleiner als der

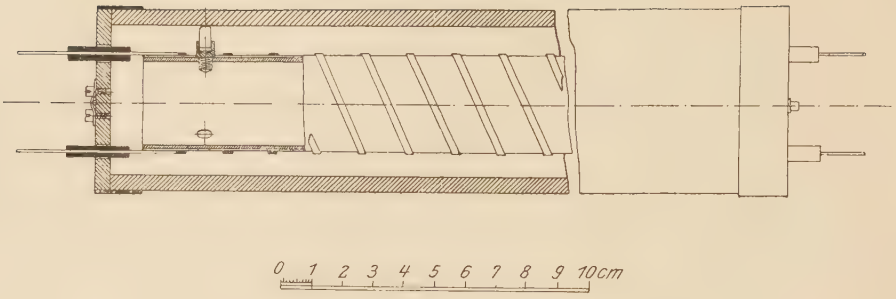


Fig. 9.

Längsdurchschnitt durch das Versuchsrohr der Versuchsreihe I: Schmiedeisen, 59 mm äußerer Durchmesser.

des Versuchsrohres. Zur Zentrierung und zur Isolierung gegen das Versuchsrohr war der Heizkörper an vier Stellen, an den Enden und je 750 mm davon entfernt mit je drei eingeschraubten Messingstiften versehen, welche an ihrem oberen Ende Hartglasstäbe trugen. Der Widerstandsdraht von 2 mm Breite wurde in zwei äquidistant laufenden Strängen von je ca. 5,6 m Länge mit einem Widerstand von je ca. 5,20 Ohm aufgewickelt und trug am Rohrende kurze, angelötete Kupferdrahtstücke von 1 mm Durchmesser, welche außen dicht neben dem Ende des Versuchsrohrs durch Messingklemmen mit den Stromzuführungs- und Spannungsmeßdrähten verbunden waren. Auf diese Weise konnte je nach der gewünschten Heizungsenergie entweder ein Zweig allein oder die beiden Zweige hintereinander oder nebeneinander geschaltet Verwendung finden. Der Strom wurde einer Akkumulatorenbatterie entnommen, welche eine Spannung von 110 Volt zur Verfügung stellte. Von der Spannung des städtischen Netzes wurde kein Gebrauch gemacht, da sie für vorliegenden Zweck zu großen Schwankungen unterworfen ist. Als Meßinstrumente für Stromstärke und Spannung dienten ein Millivolt- und Amperemeter bzw. ein Präzisionsvoltmeter von der Weston European Elektrical Company. Die Heizleistung konnte durch vorgeschaltete Widerstände reguliert werden und zwar fand für grobe Regulierung ein Glühlampenwiderstand, für feine Regulierung ein auf einen Holzrahmen isoliert aufgewickeltes Nickelinplätt Verwendung. Über die Schaltung der elektrischen Heizung gibt Fig. 10 Aufschluß.

2. Temperaturmessung.

Die Oberflächentemperatur des Versuchsrohrs wurde an sieben Stellen, die je 0,375 m voneinander entfernt waren, auf der mittleren Zylinder-Erzeugenden mittelst Thermoelementen aus Eisen-Konstantan gemessen. Außerdem war an den beiden Rohrendflächen je ein Thermoelement angebracht. Die Drähte hatten einen Durchmesser von 0,6 mm, waren ca. 5—7 m lang und an den Enden hart gelötet. Von den Lötstellen ab waren die Drähte auf ca. 0,25 m Länge mit Glasperlen, dann auf ca. 2 m Länge mit Gummischläuchen (sog. Ventilschläuchen) isoliert und führten zu einem Quecksilberumschalter, durch den alle Elemente in einen Stromkreis mit der für alle

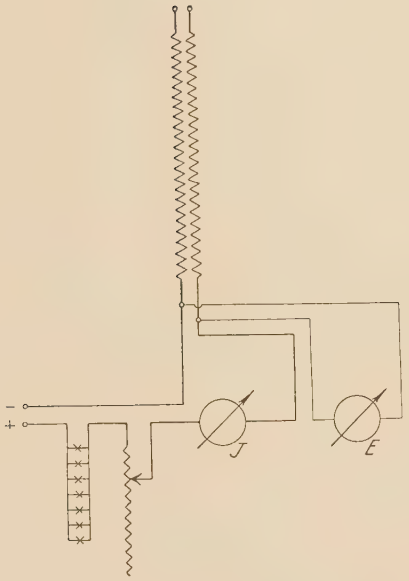


Fig. 10.

Schaltungsschema der elektrischen Heizung.

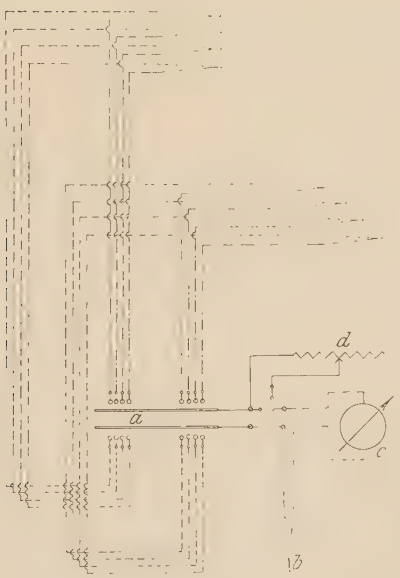


Fig. 11.

Schaltungsschema der Thermoelemente.

gemeinsamen durch Eis auf Null Grad gehaltenen Lötstelle geschaltet werden konnten. Zur Messung der elektromotorischen Kraft diente ein Galvanometer, nach Déprez d'Arsonval, von Keiser & Schmidt, Berlin, mit einem Meßbereich von 9,0 Millivolt. Für Messungen von Temperaturen über 180° C. wurde dem Galvanometer ein Manganinwiderstand von 170 Ohm vorgeschaltet. Über die Schaltung der Thermoelemente gibt das Schaltungsschema auf Fig. 11 näheren Aufschluß.

Die Thermoelement-Lötstellen wurden an der Rohroberfläche derart befestigt, daß sie durch rechteckige Plättchen mit 2,3 mm starken Schräubchen angedrückt waren; über die Plättchen und neben die Lötstelle war ein Bindekitt aus Bleiglätte und Glyzerin gelegt. Über diese Art der Oberflächen-Temperaturmessung ist schon im I. Teil (s. S. 24) gesprochen worden. Wie bereits Nusselt betont hat, und auch im I. Teil dieser Arbeit erwähnt ist, muß bei der Oberflächen-Temperaturmessung mit Thermoelementen besondere Rücksicht darauf genommen werden, daß die Drähte der benützten Thermoelemente von der Lötstelle so fortgeleitet werden, daß sie auf eine gewisse Strecke hin die gleiche Temperatur haben wie die zu messende Temperatur, da sonst durch die Drähte so viel Wärme abgeleitet wird, daß in der Umgebung der Lötstelle eine Temperatursenkung entsteht und um diese Temperatursenkung dann die Messung zu niedrig ist. Die Thermoelementdrähte wurden daher einmal vollständig um die Zylinderfläche gelegt (wie Fig. 12 zeigt) und dann um ein gutes Anliegen zu sichern, in 20 cm Entfernung unterhalb des Rohres mit sog. Feilkloben beschwert.

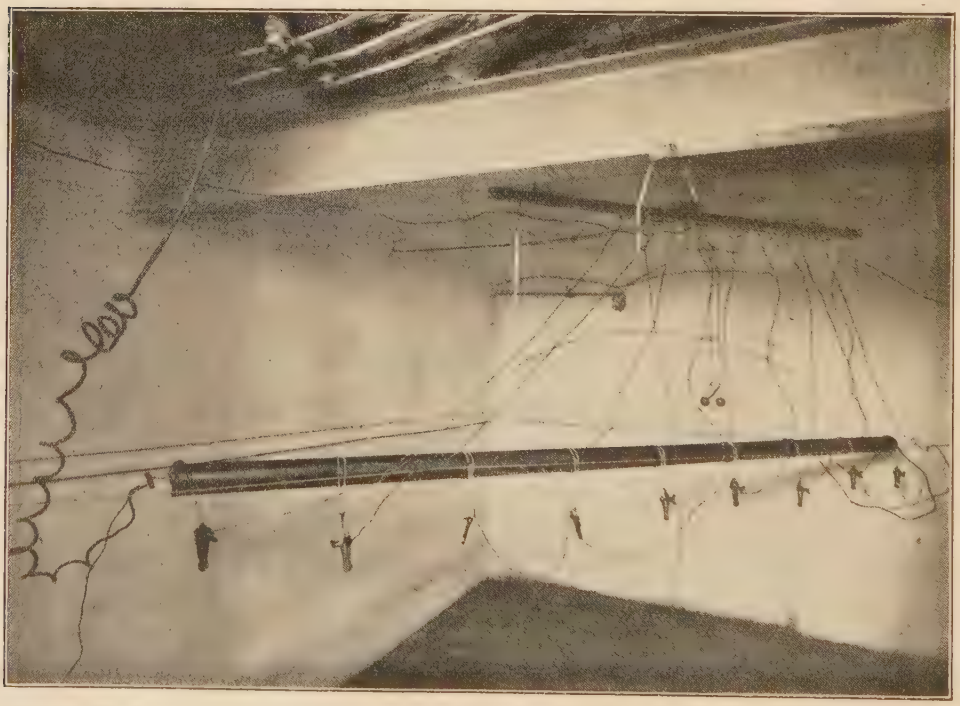


Fig. 12.

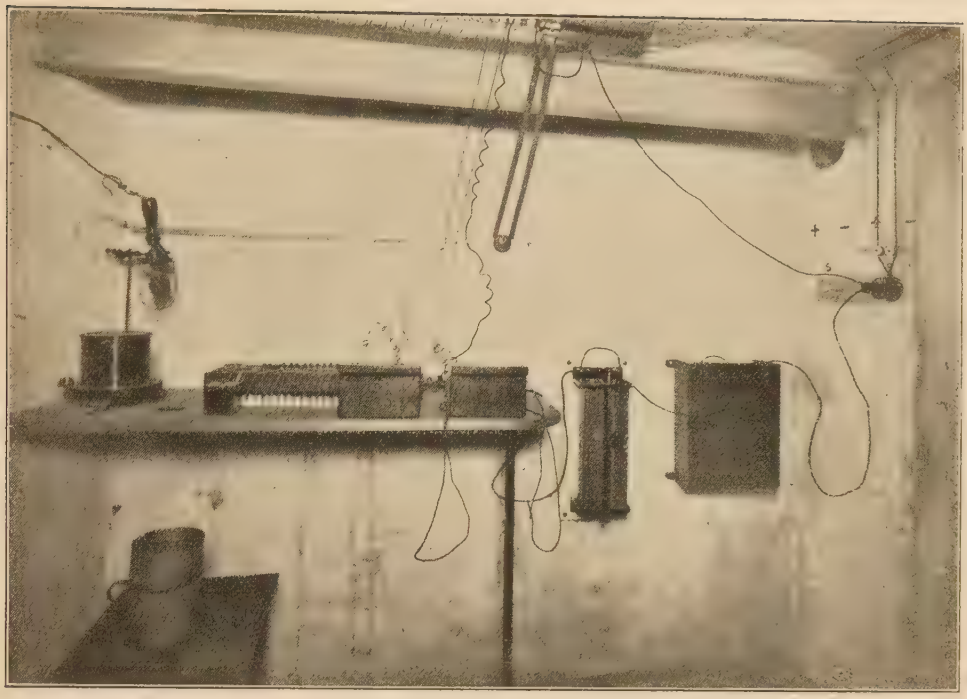


Fig. 13.

Die Temperatur der das Versuchsrohr umgebenden Luft in dem unter 3 beschriebenen Versuchsraum wurde ebenfalls mit Thermoelementen aus Eisen-Konstantan von gleicher Drahtstärke gemessen und zwar an sechs verschiedenen Stellen des Raumes in verschiedener Entfernung vom Rohr, vom Fußboden, von der Decke und von den Wänden. Die Lötstellen waren, um den Einfluß der strahlenden Wärme zu vermindern,[1]) mit Stanniol umhüllt und zeigten im allgemeinen Differenzen von 2,4 bis 6,4 im Maximum 13,1° C. In die Rechnung wurde das arimethische Mittel dieser Temperaturen eingeführt.

3. Versuchsraum.

Es erschien besonders wünschenswert, als Versuchsraum einen Ort zu wählen, der äußeren und zufälligen Einflüssen, wie plötzlicher Erwärmung oder Abkühlung durch daneben- oder darunterliegende Räume, ferner dem Regen, Schnee, Sonnenschein, Frost etc. möglichst wenig ausgesetzt ist. Zu dem Zwecke wurden die Versuche in einem Kellerraum ausgeführt, der möglichst konstante Temperatur besaß und der durch eine Trennungsmauer mit Türe in zwei Teile geschieden war. In denselben Räumen wurden auch die im I. Teil beschriebenen Strahlungsversuche angestellt. Ein Teil, der kleinere, diente als Meßraum und enthielt alle zur Temperatur- und Wärmeverlustbestimmung nötigen Instrumente, siehe Fig. 13, in Fig. 1 hinten sichtbar, der größere Teil von ca. 7,35 qm Grundfläche und ca. 2,10 m Höhe, somit

[1]) Siehe auch Meidinger, Zeitschrift für Heizungs-, Lüftungs- und Wasserleitungstechnik. Marhold, Halle, Nr. 24, S. 311, 1897.

ca. 15,5 cbm Inhalt, diente als eigentlicher Versuchsraum, siehe Fig. 13. Er nahm die zu untersuchenden Rohre auf und wurde während der ganzen Dauer des Versuchs nicht betreten, so daß also die im Versuchsraum auftretenden Erscheinungen der Strahlung, Leitung und Strömung nicht gestört wurden. Das Versuchsrohr war jeweils in diagonaler Richtung zu den Wänden des Raumes horizontal ca. 1,15 m über dem Fußboden aufgehängt.

c) Durchführung der Versuche.

1. Eichung der Thermoelemente.

Die Eichung der für die Messung der Luft- und der Rohroberflächentemperatur bestimmten Eisenkonstantan-Thermoelemente geschah, wie bei Teil I, in einem mit Öl gefüllten, elektrisch geheizten Thermostaten. Die Lötstellen wurden in dünnwandigen Reagenzgläsern untergebracht, die mit Eisenfeilspänen gefüllt waren. Als Normalthermometer diente ein von der Reichsanstalt geeichtes, in Fünftel-Grad geteiltes Quecksilberthermometer, dessen herausragender Faden mit dem Mahlkeschen Fadenthermometer korrigiert wurde. Die Eichung geschah in Stufen von 15 Grad.

Für Temperaturen bis 180° entspricht einem Skalenteil des Galvanometers eine Temperaturänderung von ca. 2,2°, für Temperaturen über 180° eine solche von ca. 3,4°, so daß also auf 0,2 bzw. 0,3° genau abgelesen werden konnte. Die Eichungen der einzelnen Thermoelemente zeigten Abweichungen von 0,3 bis 0,4 Skalenteilen im Maximum, weshalb für jedes Thermoelement eine eigene Eichkurve gezeichnet wurde. Nach Beendigung der Versuche waren die Drähte etwas angerostet, was jedoch, wie die Nacheichung ergab, ohne Einfluß war.

2. Eigentlicher Versuch.

Nachdem das Versuchsrohr in seiner Lage festgelegt, der Heizkörper eingebaut und mit den Stromzuführungsdrähten verbunden, sowie die Thermoelemente befestigt waren, wurde die Verbindungstür mit dem Meßraum geschlossen und der Versuchsraum bis zur Beendigung des Versuchs nicht mehr betreten. Dann wurde die für den gewünschten Dauerzustand nötige elektrische Heizenergie einreguliert und die Anfangstemperatur im Raum und auf der Rohroberfläche festgestellt. Der Beharrungszustand stellte sich bei konstanter Heizung im allgemeinen nach ca. 10 Stunden beim ersten Anheizen, bei weiterem Heizen auf höhere Temperaturen, nach 4—8 Stunden ein. Der Dauerzustand wurde dann 1—2 Stunden lang in Abständen von 15 bis 30 Minuten beobachtet.

3. Auswertung der Versuche.

Bei der Feststellung des Gesamtwärmeverlustes, bezogen auf die gesamte Oberfläche des 3000 mm langen Rohres, würde sich der Einfluß der Bodenflächen wie in den Versuchen von Boyer-Gouillon und Benisch und Andersen (s. S. 52 und 53) nachteilig bemerkbar machen, da ja die Strahlungs-, Leitungs-

und Konvektionsverhältnisse an den Rohrenden andere sind als im mittleren Rohrteil. Die in Fig. 14 dargestellten Kurven geben Aufschluß darüber, wie gegen das Ende des Rohres zu bei verschiedenen Versuchsreihen die Oberflächentemperatur bei einer gewissen Heizintensität abnimmt und wie stark dieser Temperaturabfall werden kann. Eine kugelförmige Anordnung der Endflächen, wie sie Boyer-Gouillon[1]) vorschlägt, vermindert nicht diesen Einfluß der Enden. Eine Einbeziehung der Endflächen würde somit bei Berechnung des Wärmeverlustes für die ganze Rohroberfläche eine wesentlich geringere Wärmeabgabe pro Flächeneinheit ergeben, als sie tatsächlich ein Rohr von den betreffenden Dimensionen zu leisten vermag.

Bei den Versuchen des Verfassers wurde nun so vorgegangen, daß ähnlich wie bei den Versuchen von Schleiermacher[2]) nicht die ganze Rohroberfläche als Wärmegeber in die Rechnung einbezogen wurde, sondern nur das mittlere Stück, also von der Mitte aus gerechnet je 0,75 m nach rechts und links. Dadurch, daß auch der unter dieser Rohroberfläche liegende Teil des Heizkörperwiderstandes genau festgestellt werden konnte, ließ sich aus dem Verhältnis dieses Teilwiderstandes zum Totalwiderstand auch die dem mittleren Rohrstück zugeführte Heizenergie berechnen und damit die

Verlauf der Oberflächentemperaturen, gemessen an neun Punkten des Rohrs.

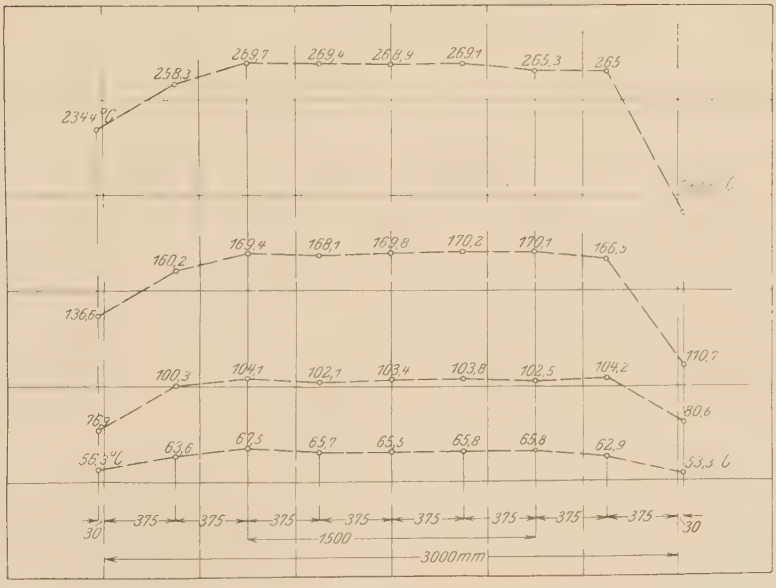


Fig. 14.

Arithmetisches Mittel der Oberflächentemperaturen, bezogen auf den mittleren Teil d. Rohrs:
z. B. **Versuchsreihe III**, Kupfer, Versuch 6 = 268,5° C. (aus 269,7; 269,4; 268,9; 269,1; 265,3).
„ „ **II**, Schmiedeisen gestrichen, Versuch 4 = 169,5° C.
„ „ **I**, Schmiedeisen matt, Versuch 2 = 103,2° C.
„ „ **IV**, Gußeisen, Versuch 1 = 66,1° C.

[1]) Boyer-Guillon, Paris 1906, l. c.
[2]) J. Schleiermacher, Wied. Ann. **26**, 287, 1885.

Wärmeabgabe dieses 1,5 m langen Rohrstückes genau feststellen. Innerhalb dieses mittleren Teiles verläuft die Temperaturkurve, wie Fig. 14 zeigt, ziemlich gleichmäßig; die auftretenden Schwankungen beruhen auf der verschiedenartigen Oberflächenbeschaffenheit und den veränderten Strömungserscheinungen. Die für die Praxis nötige Versuchsgenauigkeit ist daher vollkommen gewahrt, wenn das arithmetische Mittel aus den innerhalb dieses Rohrteils gemessenen fünf Temperaturen in die Rechnung eingeführt wird.

Um zu konstatieren, inwieweit eventuell noch die Rohrlänge diesen Temperaturverlauf auf der Rohroberfläche beeinflussen könnte, wurde auch noch ein 1,5 m langes Gußeisenrohr untersucht und auch aus diesem der mittlere Teil herausgegriffen und auf seine Wärmeabgabe untersucht. Bei einem Vergleich mit dem 3,0 m langen Gußeisenrohr desselben Durchmessers ergaben sich nach Umrechnung der Wärmeabgabe auf die Flächeneinheit keinerlei Differenzen, d. h. bei gleicher Wärmeabgabe der Flächeneinheit wurde die gleiche Oberflächentemperatur erreicht. Als Temperatur der umgebenden Luft wurde wie schon erwähnt das arithmetische Mittel aus den gemessenen sechs Lufttemperaturen eingesetzt. Über die Berechnung der strahlenden Wärme und das rechnerische Verfahren der Versuche wurde schon auf Seite 55 Näheres erwähnt.

d) Versuchsergebnisse.

Die Versuchsergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen niedergelegt. Dieselben enthalten in den beiden ersten Reihen die Nummer und das Datum des Versuchs, und in der dritten Reihe die aus Spannung und Stromstärke berechnete, dem Heizkörper zugeführte elektrische Heizenergie. In den beiden folgenden Reihen 4 und 5 ist in Watt und in Wärmeeinheiten pro Stunde die Wärmeabgabe des auf Seite 63 erwähnten mittleren Rohrteils, in Reihe 6 die Wärmeabgabe der Oberflächeneinheit festgestellt. Die drei folgenden Reihen zeigen in ^{0} C. die mittlere Raum- und die mittlere Rohroberflächentemperatur, sowie deren Unterschied. Reihe 10 und 11 enthalten die Raum- und Oberflächentemperatur in absoluter Zählung, in den beiden folgenden Reihen ist die aus diesen Temperaturen mit Hilfe der im I. Teil bestimmten Strahlungskonstanten berechnete Strahlungsräume in W. E. und in Prozenten der Gesamtwärme angegeben. Subtrahiert man die Strahlungswärme (Reihe 12) von der Gesamtwärme (Reihe 6), so erhält man die durch Leitung und Konvektion abgegebene Wärme, welche in den Reihen 14 und 15 in W. E. und in Prozenten der Gesamtwärme angegeben wird. Reihe 16 enthält dann den mit Gleichung auf Seite 56 berechneten Wert von k_2 (in Tabelle X sind die Reihen 10 mit 16 nicht aufgenommen). Um die Versuchsergebnisse in bequemer Weise vergleichbar zu machen mit den von anderer Seite, in der Literatur angegebenen älteren Bestimmungen, ist außerdem in Reihe 17 der auf Seite 56 definierte Koeffizient K berechnet worden, obgleich aus den oben angeführten Gründen derselbe mehr technische als wissenschaftliche Bedeutung hat.

1. Einfluß des Materials.

Um festzustellen, ob die durch Berührung mit der Luft übergeführte Wärme unabhängig ist von dem Material des Wärme abgebenden Körpers, wurden (in den Versuchsreihen I, III und IV) mit Schmiedeisen, Kupfer und Gußeißen Versuche an Rohren von gleichem äußeren Durchmesser und gleicher Länge vorgenommen (siehe Tab. IX, X und XI und Fig. 15, 16 und 17). In Fig. 17 ist eine vergleichende Übersicht der mit diesen Materialien erreichten Gesamtwärmeverluste angegeben. Es zeigt sich, daß das Schmiedeisenrohr die größte Wärmeabgabe aufweist, dann folgt das Gußeisenrohr, während das Kupferrohr bei gleicher Übertemperatur nur ca. 41—46 % der Wärmeabgabe des Schmiedeisenrohrs besitzt.

Wenn auch die Versuche über Wärmestrahlung im Teil I für Gußeisen, das damals eine verhältnismäßig rauhe Oberfläche hatte, einen höheren Koeffizienten (4,48) ergaben als für Schmiedeisen (4,40), das eine mehr glatte

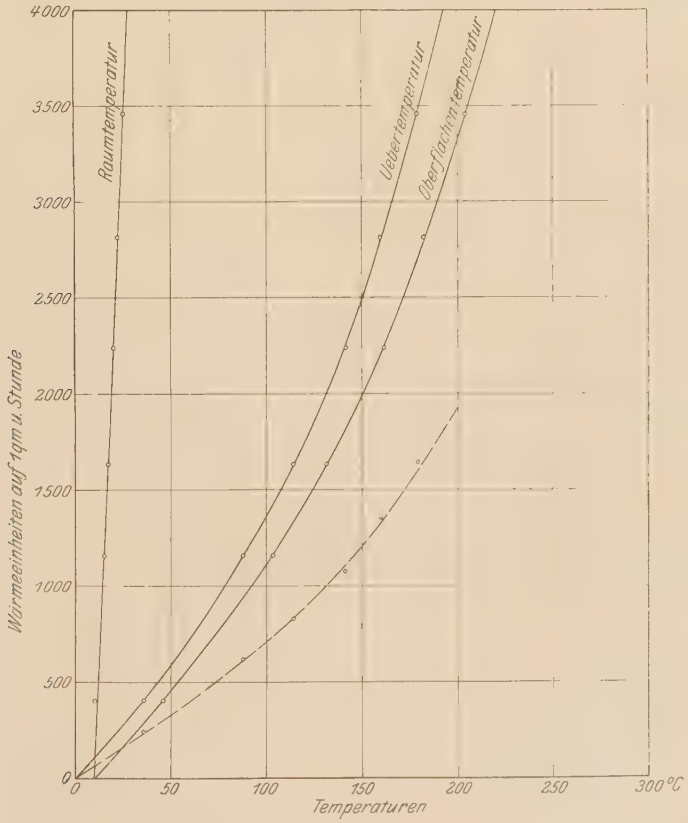


Fig. 15.

Wärmeabgabe eines schmiedeisernen Rohrs von 59 mm äußerem Durchmesser.

Versuchsreihe I. Oberfläche: matt, mit Walzhaut, ungestrichen.

— — — — ist die durch Berührung mit der Luft abgegebene Wärmemenge in ihrer Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Rohroberfläche und Raumluft.

Oberfläche zeigte, und wenn anderseits hier Schmiedeisen eine größere Wärmeabgabe brachte als Gußeisen, so ist doch zu bemerken, daß der Unterschied verhältnismäßig gering ist und für die Zwecke der Praxis die Wärmeabgabe eines schmiedeisernen Rohres der eines gußeisernen gleichgesetzt werden kann.

Die durch Leitung und Konvektion übergegangene Wärme, k_2, in Wärmeeinheiten pro Flächeneinheit und 1° Temperaturdifferenz zwischen Heizkörper und Luft, beträgt

bei einem Temperaturüberschuß von		50°	100°	150°
„ „ Schmiedeisenrohr von 59 mm äußerem Durchmesser		6,6	7,4	8,3
„ „ Gußeisenrohr „ „ „ „ -		5,8	6,6	7.4
„ „ Kupferrohr „ „ „ „ „		6,1	6,8	8,1

k_2 ist also von der Temperaturdifferenz abhängig.

Eine Formel zur Berechnung des Wertes von k_2 für verschiedene Temperaturen findet sich auf Seite 72.

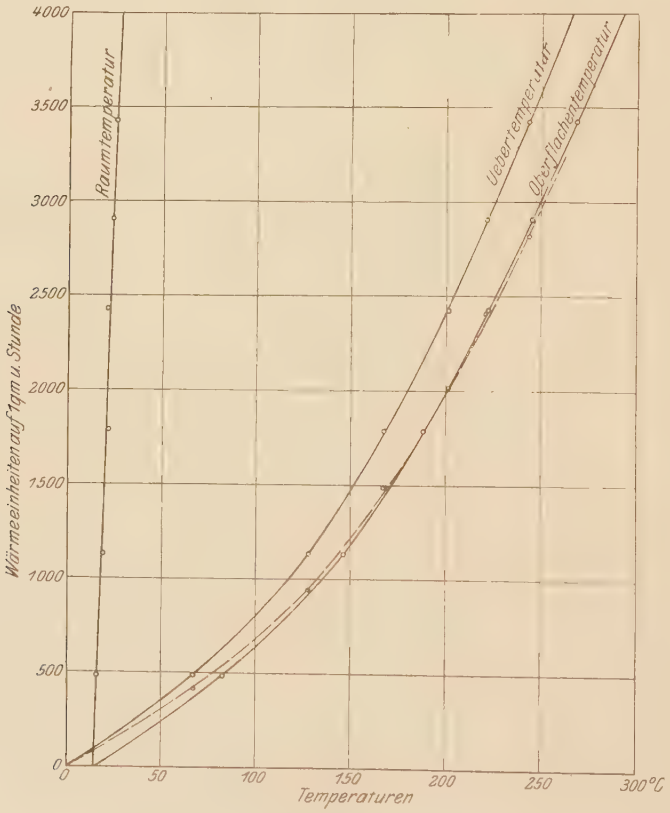


Fig. 16.

Wärmeabgabe eines Kupferrohrs von 59 mm äußerem Durchmesser.

Versuchsreihe III. Oberfläche: matt, schwachpoliert.

— — — — ist die durch Berührung mit der Luft abgegebene Wärmemenge in ihrer Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen der Rohroberfläche und der Raumluft.

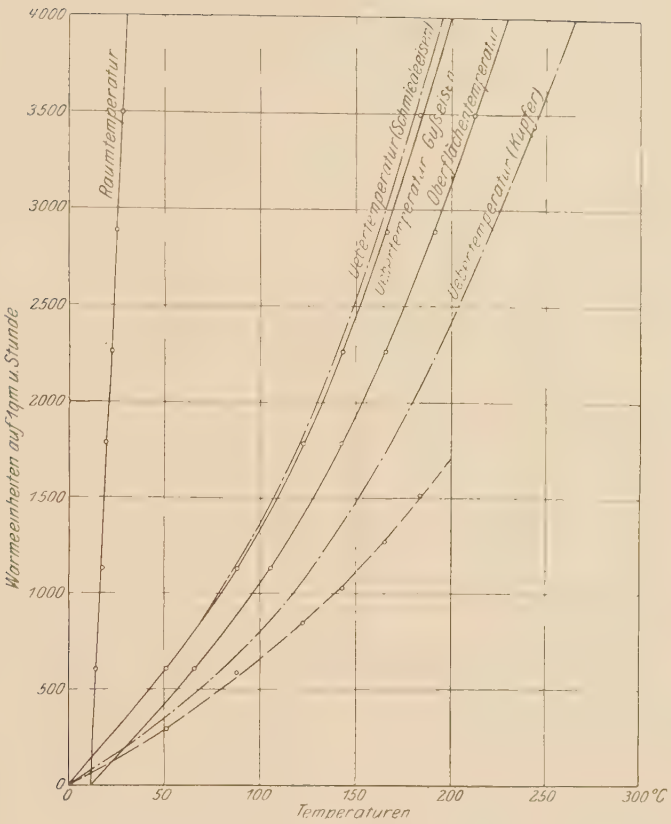


Fig. 17.

Wärmeabgabe eines gusseisernen Rohrs von 59 mm äußerem Durchmesser.

Versuchsreihe IV. Oberfläche: matt, mit Gußhaut.

— — — — ist die durch Berührung mit der Luft abgegebene Wärmemenge des Gußeisenrohrs in ihrer Abhängigkeit von der Temperaturdifferenx.

—·—·—·— ist die Gesamtwärmeabgabe des Gußeisen- bzw. Kupferrohrs abhängig von der Temperaturdifferenz.

Tabelle IX.

Zu Versuchsreihe I.

(Schmiedeisernes, ungestrichenes Rohr von 59 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur absolut	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In % der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In % der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} $^0C.^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E. pro qm, Stunde, 1^0 C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ^{0}C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	20. I. 08	250,0	130,4	112,1	403,3	10,2	46,2	36,0	283,2	319,2	162,6	40,3	240,7	59,7	6,09	11,2
2	21. I. 08	717,4	374,2	321,8	1157,6	15,4	103,2	87,8	288,4	376,2	539,7	46,6	617,9	53,4	7,04	13,2
3	5. II. 08	1009,4	527,9	454,0	1633,1	17,2	131,3	114,1	290,2	404,3	802,8	49,2	830,3	50,8	7,28	14,3
4	11. II. 08	1392,3	724,0	622,6	2239,7	20,2	161,7	141,5	293,2	434,7	1165,6	52,0	1074,1	48,0	7,60	15,8
5	6. II. 08	1744,6	908,9	781,7	2811,7	22,7	182,5	159,8	295,7	455,5	1457,4	51,8	1353,3	48,2	8,47	17,6
6	24. I. 08	2145,0	1117,5	961,1	3457,0	25,3	204,6	179,3	298,3	477,6	1815,8	52,5	1641,2	47,5	9,15	19,3

Tabelle X.

Zu Versuchsreihe III.

(Kupferrohr von 59 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur ^{0} C.	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In $^0/_0$ der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In $^0/_0$ der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} ^{0}C.$^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E. pro qm, Stunde, 1^0 C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ^{0} C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	28. II. 08	301,1	157,0	135,0	485,6	15,7	82,8	67,1	288,7	355,8	70,8	14,6	414,8	85,4	6,18	7,2
2	27. II. 08	700,4	365,3	314,2	1130,1	18,8	146,9	128,1	291,8	419,9	186,0	16,5	944,1	83,5	7,37	8,8
3	11. II. 08	1100,8	577,4	497,0	1786,2	21,1	188,7	167,6	294,1	461,7	296,3	16,6	1489,9	83,4	8,89	10,7
4	5. III. 08	1499,4	784,2	674,0	2426,0	21,0	222,3	201,3	294,0	495,3	411,0	16,9	2015,0	83,1	10,02	12,1
5	7. III. 08	1801,2	938,4	807,2	2902,9	23,6	245,1	221,5	296,6	518,1	502,0	17,3	2400,9	82,7	10,85	13,1
6	9. III. 08	2125,0	1107,1	952,5	3424,9	25,0	268,5	243,5	298,0	541,5	608,0	17,8	2816,9	82,2	11,56	14,1

Tabelle XI.

Zu Versuchsreihe IV.

(Gusseisernes Rohr von 59 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur ⁰ C.	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} $^0C.^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E. pro qm, Stunde, 1^0 C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ⁰ C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	27. III. 08	347,4	181,2	155,8	560,5	14,5	66,1	51,6	287,5	339,1	267,5	47,7	293,0	52,3	5,68	10,9
2	27. III. 08	700,3	365,3	314,0	1130,0	17,9	106,1	88,2	290,9	379,1	545,0	48,2	585,0	51,8	6,63	12,8
3	30. III. 08	1105,2	578,0	497,3	1788,0	19,5	142,4	122,9	292,5	415,4	940,1	52,6	847,9	47,4	6,90	14,5
4	31. III. 08	1405,9	731,1	628,0	2261,7	22,5	165,8	143,3	295,5	438,8	1232,5	54,5	1029,2	45,5	7,18	15,8
5	1. IV. 08	1791,2	933,2	802,5	2886,8	25,1	191,4	166,3	298,1	464,4	1616,1	56,0	1270,7	44,0	7,64	17.4
6	2. IV. 08	2170,5	1130,8	974,0	3497,6	28,6	212,5	183,9	301,6	485,5	1979,5	56,6	1518,4	43,4	8,26	19,0

2. Einfluß des Durchmessers.

Daß mit zunehmendem Durchmesser die Wärmeabgabe der Flächeneinheit zylindrischer Körper abnimmt, hat schon Péclet[1]) und nach ihm eine große Anzahl der unter Absatz A, b erwähnten Experimentatoren nachgewiesen. Auch deutet die Analogie mit elektrischen Heizungsdrähten, bei denen eine Abhängigkeit der Erwärmung[2]) vom Durchmesser festgestellt ist,

Einfluss des Rohrdurchmessers auf die durch Berührung mit der Luft abgegebene Wärme bei verschiedenen Übertemperaturen.

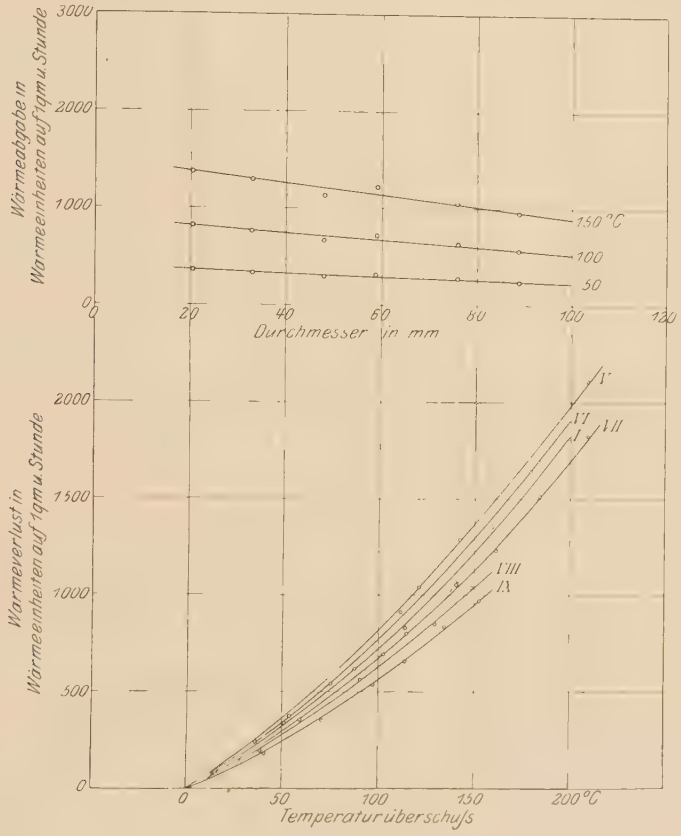


Fig. 18.

Wärmeabgabe durch Berührung mit der Luft (Wärmeleitung der Luft und Konvektion) **bei schmiedeisernen Rohren von verschiedenen Durchmessern in ihrer Abhängigkeit von der Übertemperatur.**

Versuchsreihe	**I**	= 59	mm	äußerer Durchmesser.
„	**V**	= 20,5	„	„ „
„	**VI**	= 33	„	„ „
„	**VII**	= 48	„	„ „
„	**VIII**	= 76	„	„ „
„	**IX**	= 89	„	„ „

[1]) Péclet, Traité de la chaleur, l. c.

[2]) Eine ausführliche Besprechung dieser Untersuchungen findet sich in: J. Teichmüller, Die Erwärmung der elektrischen Leitungen. Stuttgart 1905, S. 2 u. ff.

auf die Richtigkeit dieser Tatsache hin. Die Versuche des Verfassers haben neuerdings den Einfluß des Durchmessers auf die Wärmeabgabe, der in der vermehrten Wärmeströmung bei kleinem Durchmesser begründet ist, erkennen lassen. Der Einfluß des Durchmessers wurde für die Temperaturdifferenzen 50°, 100° und 150° C. auf Fig. 18 graphisch dargestellt. Es zeigte sich, bei einem Rohr von 89 mm äußerem Durchmesser und bei einem Temperaturüberschuß von 50 bzw. 100 bzw. 150° gegenüber einem Rohr von 20,5 mm äußerem Durchmesser eine Verminderung der durch Leitung und Strömung abgegebenen Wärme von ca. 32%, also eine Abnahme der Wärmeabgabe mit zunehmendem Durchmesser.

Somit ist der Koeffizient k_2 nicht nur von der Temperaturdifferenz und dem Material, sondern auch vom Durchmesser abhängig. Diese Abhängigkeit läßt sich durch die rein empirische Formel zum Ausdruck bringen:

$$k_2 = \frac{p\,(t_1 - t_2)^{0{,}233}}{d^{0{,}3}}$$

worin die Konstante $p = 0{,}97$ für mattes Gußeisen (mit Gußhaut); $= 0{,}91$ für mattes Schmiedeisen und $= 0{,}55$ für schwach poliertes Kupfer, t_1 die Temperatur in ° C. des warmen Körpers, t_2 die Temperatur der Luft in ° C. und d den Durchmesser des horizontalen Rohres in m bedeutet.

Für die von einem Heizkörper (horizontales Rohr) abgegebene Wärme bekommen wir also in einem Temperaturbereich von 0 — 170° C. Übertemperatur die folgende Gleichung:

$$S = S_1 + S_2 = F \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}} + \frac{p\,(t_1 - t_2)^{1{,}233}}{d^{0{,}3}} \right\},$$

worin F, T_1, T_2, C_1, C_2 und C die auf Seite 55 und p, t_1, t_2, d die oben angeführte Bedeutung haben.

Es sei noch bemerkt, daß bei der Wärmeabgabe von Rohren die durch Strahlung abgegebene Wärme ungefähr 40—60% der Gesamtwärmeabgabe ausmacht und zwar nimmt die ausgestrahlte Wärme mit wachsender Temperatur stärker zu als die durch Berührung mit der Luft, also durch Leitung und Strömung übergegangene Wärmemenge.

Tabelle XII.

Zu Versuchsreihe V.

(Schmiedeisernes Rohr von 20,5 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur ⁰ C.	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} $^0C.^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E. pro qm, Stunde, 1⁰ C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ⁰ C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4. VI. 08	148,6	76,2	65,5	678,4	20,8	74,6	53,8	293,8	347,6	308,1	45,4	370,3	54,6	6,88	12,6
2	10. VI. 08	432,8	220,0	189,2	1959,5	20,4	142,2	121,8	293,4	415,2	918,3	46,9	1041,2	53,1	8,55	16,1
3	9. VI. 08	541,5	277,8	238,9	2474,3	21,3	163,8	142,5	294,3	436,8	1189,6	48,1	1284,7	51,9	9,02	17,4
4	9. VI. 08	986,0	505,8	435,0	4505,3	24,3	234,0	209,7	297,3	507,0	2398,4	53,2	2106,9	47,8	10,05	21,5

Tabelle XIII.

Zu Versuchsreihe VI.

Schmiedeisernes Rohr von 33 mm äusserem Durchmesser.

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur ⁰ C.	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} $C.^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E. pro qm, Stunde, 1⁰ C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ⁰ C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4. V. 08	210,6	108,5	93,3	600,3	16,4	67,5	51,1	289,4	340,5	264,6	44,1	335,7	55,9	6,57	11,7
2	30. IV. 08	344,4	177,4	152,6	981,8	17,6	92,7	75,1	290,6	365,7	442,6	45,1	539,2	54,9	7,18	13,1
3	4. V. 08	600,4	309,2	265,9	1710,8	19,5	130,8	111,3	292,5	403,8	797,8	46,6	913,0	53,4	8,20	15,4
4	1. V. 08	1264,4	646,1	555,6	3574,6	24,2	208,2	184,0	297,2	481,2	1886,0	52,8	1688,6	47,2	9,18	19,4

Tabelle XIV.

Zu Versuchsreihe VII.

(Schmiedeisernes Rohr von 48 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur ^{0} C.	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In % der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In % der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} ^{0} C.$^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E pro qm, Stunde, 1^0 C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ^{0} C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	3. IV. 08	343,9	178,0	153,1	677,2	17,4	77,1	59,7	290,4	350,1	325,7	48,1	351,5	51,9	5,89	11,3
2	3. IV. 08	710,6	367,7	316,2	1399,4	20,0	122,8	102,8	293,0	395,8	706,9	50,5	692,5	49,5	6,74	13,6
3	28. IV. 08	829,0	429,0	368,9	1632,5	19,5	133,8	114,3	292,5	406,8	826,0	50,6	806,5	49,4	7,06	14,3
4	10. IV. 08	1102,1	570,3	490,5	2170,5	23,6	160,8	137,2	296,6	433,8	1139,2	52,5	1031,1	47,5	7,52	15,8
5	28. IV. 08	1134,9	587,3	505,1	2234,9	22,1	163,1	141,0	295,1	436,1	1176,5	52,7	1058,4	47,3	7,51	15,9
6	7. IV. 08	1390,5	719,6	618,9	2738,2	25,0	186,3	161,3	298,0	459,3	1507,4	55,1	1230,8	44,9	7,63	17,0
7	8. IV. 08	1750,5	905,9	779,1	3447,2	27,4	211,6	184,2	300,4	484,6	1934,9	56,1	1512,3	43,9	8,21	18,7
8	25. IV. 08	2179,2	1127,7	969,8	4291,4	28,8	238,1	209,3	301,8	511,1	2467,6	57,5	1823,8	42,5	8,71	20,5

Tabelle XV.

Zu Versuchsreihe VIII.

(Schmiedeisernes Rohr von 76 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur ⁰ C.	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ⁰/₀ der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} $^0C.^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E. pro qm, Stunde, 1⁰ C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ⁰ C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	7. V. 08	304,8	160,0	137,6	384,4	17,6	56,3	38,7	290,6	329,3	190,6	49,6	193,8	50,4	5,01	9,9
2	7. V. 08	916,3	482,0	414,5	1157,8	21,7	112,2	90,5	294,7	385,2	595,7	51,4,	562,1	48,6	6,21	12,8
3	9. V. 08	1513, 0	795,8	684,4	1911,8	26,6	155,9	129,3	299,6	428,9	1061,2	55,5	850,6	44,5	6,59	14,8
4	9. V. 08	1897,0	997,8	858,1	2396,8	29,3	177,7	148,4	302,3	450,7	1354,7	56,5	1042,1	43,5	7,02	16,2

Tabelle XVI.

Zu Versuchsreihe IX.

(Schmiedeisernes Rohr von 89 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe des ganzen Rohrs in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Teils des Rohrs			Mittlere Raumtemperatur ^{0} C.	Auf den mittleren Rohrteil bezogen		Mittlere Raumtemperatur absolut	Mittlere Rohroberflächentemperatur absolut	Strahlungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ^{0}/$_0$ der Gesamtwärme	Leitungswärme in W. E. pro qm und Stunde	In ^{0}/$_0$ der Gesamtwärme	Wärmeübergangskoeffizient für Berührung mit der Luft in W. E. m^{-2} st^{-1} ^{0}C.$^{-1}$	Wärmeabgabe in W. E pro qm, Stunde, 1^0 C. Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro qm und Stunde		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied ^{0} C.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	13. IV. 08	353,9	185,8	159,8	381,3	16,0	56,5	40,5	289,0	329,5	198,1	51,9	183,2	48,1	4,52	9,4
2	14. IV. 08	705,6	370,4	318,5	760,3	17,7	88,0	70,3	290,7	361,0	405,1	53,3	355,2	46,7	5,05	10,8
3	15. IV. 08	1109,6	582,6	501,0	1195,7	21,6	118,8	97,2	294,6	391,8	659,9	55,2	535,8	44,8	5,51	12,3
4	16. IV. 08	1415,5	743,1	639,1	1525,3	24,7	138,7	114,0	297,7	411,7	859,3	56,3	666,0	43,7	5,84	13,4
5	21. IV. 08	1814,4	956,2	822,3	1962,6	25,2	160,2	135,0	298,2	433,2	1124,2	57,3	838,4	42,7	6,21	14,5
6	22. IV. 08	2205,4	1162,2	999,5	2385,5	29,2	181,6	152,4	302,2	454,6	1414,8	59,3	970,7	40,7	6,37	15,7

3. Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit.

Für die Zwecke der Praxis sollten noch vergleichende Versuche darüber Aufschluß geben, inwieweit der Anstrich von Rohren deren Wärmeabgabe beeinflußt. Nach Rietschel wird nämlich durch grauen Anstrich eine geringe Verminderung der Wärmeabgabe herbeigeführt, während ein dunkler, matter Anstrich ohne Einfluß ist. Um nun einen Anstrich zu wählen, dessen Farbe sich mit zunehmender Oberflächentemperatur nicht verändert, wurden vom Verfasser zunächst Versuche darüber unternommen, wieweit sich die im Handel gebräuchlichsten Heizkörperfarben mit wachsender Oberflächentemperatur verändern. Auf ein 3000 mm langes Schmiedeisenrohr von 59 mm äußerem Durchmesser (Versuchsrohr der Versuchsreihe I) wurden in einer Länge von je 300 mm, ausgehend von der Rohrmitte, sechs verschiedene Anstriche, meist lichtgrauer bis weißer Färbung, aufgetragen und die Oberflächentemperaturen thermoelektrisch gemessen. Es wurde verwendet:

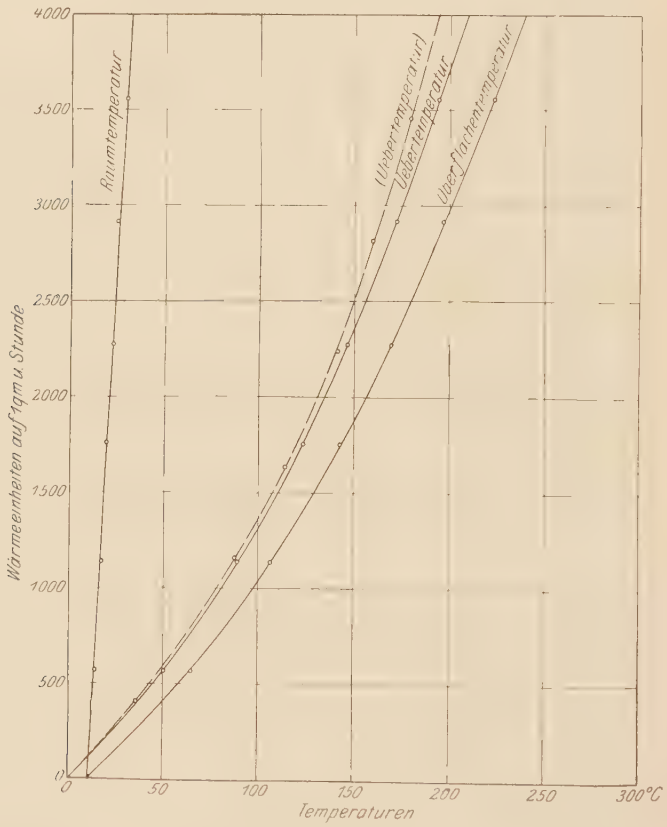


Fig. 19.

Wärmeabgabe eines schmiedeisernen Rohrs von 59 mm Durchmesser.

Versuchsreihe II. Oberfläche mit Gips gestrichen.

Die gestrichelte Kurve stellt die Wärmeabgabe des matten Rohrs abhängig von der Übertemperatur dar (siehe auch Fig. 15).

1. Schlemmkreide mit Wasserglas angerührt (weiß);
2. sog. Spirituslack (lichtgrau);
3. Heizkörperfarbe (weißgrau);
4. Emaillelackfarbe, sog. Speziallack (lichtgrau);
5. Emaillelack (weißgelb);
6. Alabastergips mit Wasser (weiß).

Das Rohr wurde elektrisch erhitzt und zwar zeigte sich, daß bei einer Oberflächentemperatur von 131° C. Farbe 5 bereits braungelb und bei einer solchen von 134° C. die Farben 2 und 4 bereits braungrau wurden. Bei 186° Oberflächentemperatur, wo die Farben 2, 4 und 5 schon braun waren, fing Farbe 3 erst an, sich etwas lichtgelb zu färben, während Anstrich 1 Sprünge zeigte. Die Versuche wurden bis zu 210° Oberflächentemperatur fortgesetzt. Auch hier hatte Anstrich 6 sein Aussehen noch nicht geändert, während die anderen Anstriche bereits wesentlich verändert waren.

Da nach diesen Versuchen der Anstrich mit Farbe 3 und 6, also mit Heizkörperfarbe und mit Gips, sich mit zunehmender Temperatur am wenigsten verändert hatte, so wurden diese zu den Versuchen über Wärmeabgabe benutzt. Es wurde dazu ein matt oxydiertes Schmiedeisenrohr verwendet, welches zunächst in nacktem und dann in angestrichenem Zustand untersucht wurde. Tabelle IX und Fig. 15 geben die Wärmeverluste dieses matten, ungestrichenen Rohres an. Ein Anstrich mit Heizkörperfarbe 3 beeinflußte die Wärmeabgabe nicht wesentlich. Dagegen verursachte ein Anstrich mit Gips eine geringe Verminderung der Wärmeabgabe, wie dies aus Tabelle XVII und Fig. 19 zu ersehen ist. Es findet dies eine einfache Erklärung dadurch, daß die glatte Gipsoberfläche wohl sicher eine kleinere Strahlungskonstante wie Schmiedeisen haben wird, nachdem schon die Strahlungskonstante des rauhen Kalkmörtels hinter der des Schmiedeisens zurückbleibt.

Die Verminderung der Wärmeabgabe betrug bei dem mit Gips gestrichenen Rohr gegenüber dem matten, oxydierten Rohr bei einer Oberflächentemperatur von 25°, 75°, 125° und 175° C. bzw. 3,6, 4,2, 4,0, 9,1 %. Diese vergleichenden Versuche zeigen also, daß eine wesentliche Änderung der Wärmeabgabe durch den Anstrich nicht herbeigeführt wird.

Tabelle XVII.

Zu Versuchsreihe II.

(Mit Gips gestrichenes, schmiedeisernes Rohr von 59 mm äusserem Durchmesser.)

Nummer des Versuchs	Datum des Versuchs	Wärmeabgabe der ganzen Rohroberfläche in Watt	Wärmeabgabe des mittleren Rohrteils			Mittlere Raumtemperatur in ⁰ C.	Auf den mittleren Teil des Rohrs bezogen		Wärmeabgabe in W. E. pro qm, Stunde und 1⁰ Temperaturunterschied
			in Watt	in W. E. pro Stunde	in W. E. pro Stunde und qm		Rohroberflächentemperatur	Temperaturunterschied	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	17
1	16. III. 08	349,8	182,5	156,6	564,6	14,1	65,0	50,9	11,1
2	17. III. 08	703,8	367,1	315,3	1135,6	17,2	106,4	89,2	12,7
3	18. III. 08	1090,5	567,1	484,3	1754,3	19,6	143,0	123,4	14,2
4	20. III. 08	1403,8	734,2	630,5	2271,3	22,9	169,5	146,6	15,5
5	23. III. 08	1808,4	942,2	808,0	2914.7	24,8	197,0	172,2	16,9
6	24. III. 08	2205,5	1149,1	987,0	3554,8	29,2	223,2	194,0	18,3

C. Zusammenfassung der wichtigsten Resultate.

Den vorliegenden Versuchen über die Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft ist die Gleichung zu Grunde gelegt:

$$S = S_1 + S_2 = F \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}} + k_2 (t_1 - t_2) \right\}.$$

Hierin bedeutet S die Gesamtwärmeabgabe des geheizten Körpers, S_1 die durch Strahlung, S_2 die durch Berührung mit der Luft, also durch Wärmeleitung der Luft und Konvektion, abgegebene Wärmemenge.

Der erste Summand S_1 wurde im I. Teil der vorliegenden Arbeit (S. 3 bis S. 43) untersucht, während die Resultate über den Summanden S_2 im II. Teil (S. 43 bis S. 80) niedergelegt sind. Dabei stellten sich folgende Ergebnisse ein:

Im I. Teil:

1. Die in der Heiztechnik gebräuchlichsten Materialien befolgen mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit das Stefansche Gesetz, d. h. ihre Strahlung ist proportional der 4. Potenz ihrer absoluten Temperatur.

2. Aus der Gültigkeit des Stefanschen Gesetzes folgt: die von einem Körper I mit dem Strahlungskoeffizienten C_1 und der Oberfläche F_1, in Quadratmetern gegen einen ihn umschließenden Körper II mit dem Strahlungskoeffizienten C_2 in der Stunde ausgestrahlte Wärmemenge in Wärmeeinheiten ist:

$$S_1 = F_1 \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}},$$

wenn T_1 und T_2 die Oberflächentemperatur des strahlenden und bestrahlten Körpers und C die Strahlungskonstante des absolut schwarzen Körpers = 4,61 W. E. m^{-2} st^{-1} bedeutet. Daraus ergeben sich als Strahlungskoeffizienten C_1 (ausgestrahlte Wärme pro Quadratmeter Stunde, $^0C.^{-4}$), für Lampenruß 4,44, für mattes Messing 1,03, für schwachpoliertes Kupfer 0,79, für hochpoliertes Schmiedeisen 1,33, für oxydiertes mattes Schmiedeisen 4,40, für Zink 0,97, für Gußeisen 4,48, für Kalkmörtel 4,30 W. E. m^{-2} st^{-1} $(^0C)^{-4}$.[1])

3. Das Emissionsvermögen der Metalle ist, wie auch frühere Beobachtungen zeigten, umgekehrt proportional ihrem elektrischen Leitvermögen und ihrer Wärmeleitfähigkeit.

[1]) Über die Erklärung der auffallend hohen Werte für Kalkmörtel, s. S. 39.

Im II. Teil:

1. Die durch Berührung mit der Luft abgegebene Wärmemenge läßt sich ausdrücken durch die Formel

$$S_2 = F \cdot k_2 (t_1 - t_2),$$

worin t_1 die Temperatur des warmen Körpers, t_2 die Temperatur der Luft, F die Oberfläche in Quadratmeter bedeutet. k_2 ist die durch Leitung und Strömung übergegangene Wärme in W. E. pro Quadratmeter und 1° Temperaturdifferenz und ist größer als bisher angenommen wurde.

Für k_2 wurden bei horizontalen Rohren folgende Werte gefunden:

	bei einem Temperaturüberschuß von		
	50°	100°	150°
bei einem schmiedeisernen Rohr			
von 33 mm äußerem Durchmesser	7,0	7,8	8,7
„ 59 „ „ „	6,6	7,4	8,3
„ 89 „ „ „	4,7	5,5	6,3
bei einem Gußeisenrohr			
von 59 mm äußerem Durchmesser	5,8	6,6	7,4
bei einem Kupferrohr			
von 59 mm äußerem Durchmesser	3,6	3,7	4,1.

Als rein empirische Formel für k_2 mag bei horizontalen Rohren gesetzt werden:

$$k_2 = \frac{p\,(t_1 - t_2)^{0{,}233}}{d^{0{,}3}},$$

worin t_1, t_2 die oben angeführte Bedeutung hat, während $p = 0{,}97$ für Gußeisen, $= 0{,}91$ für Schmiedeisen, $= 0{,}55$ für Kupfer und d den Durchmesser in Metern bedeutet.

2. Die durch Strahlung abgegebene Wärme von horizontalen Rohren beträgt ungefähr 40—60% der Gesamtwärmeabgabe und nimmt mit wachsender Temperatur stärker zu als die durch Berührung mit der Luft abgegebene Wärme.

3. Die Gesamtwärmeabgabe K eines Heizungsrohres pro Quadratmeter, Stunde und 1° Temperaturdifferenz, eine Zahl, welche hauptsächlich den Zwecken der Praxis dienen soll, beträgt in Wärmeeinheiten:

	bei einem Temperaturunterschied von			
	50°	100°	150°	200°
a) beim schmiedeisernen Rohr				
von 33 mm äuß. Durchm.	11,9	13,9	16,9	.
„ 59 „ „ „	11,6	13,6	16,6	.
„ 89 „ „ „	9,9	12,3	15,6	. .
b) beim kupfernen Rohr				
von 59 mm äuß. Durchm.	6,8	8,1	9,6	11,7
c) beim gußeisernen Rohr				
von 59 mm äuß. Durchm.	10,9	13,1	16,1	.

4. Die Wärmeabgabe von gußeisernen und schmiedeisernen Rohren kann mit einer für die Praxis meist hinreichenden Genauigkeit gleichgesetzt werden.
5. Der Anstrich der Rohre beeinflußt deren Wärmeabgabe nur sehr wenig und kann tm allgemeinen unberücksichtigt bleiben.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden in der Zeit vom Herbst 1907 bis Frühjahr 1909 im Laboratorium für technische Physik der K. Technischen Hochschule München ausgeführt.

Es ist mir ein Bedürfnis, auch an dieser Stelle meinem verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. O. Knoblauch, den wärmsten Dank auszusprechen für die vielfachen Anregungen und die stete Fürsorge, die er meiner Arbeit zuteil werden ließ.

Die Geldmittel zur Ausführung der Versuche hatte in dankenswerter Weise und in reichem Maße der Verein Deutscher Ingenieure zur Verfügung gestellt.

München, den 10. April 1909.

Berichtigung.

Seite 72 Zeile 16 v. o. lies 1,04 statt 0,55.
„ 82 „ 19 v. o. „ 6,1 · 6,8 · 8,1 statt 3,6 · 3,7 · 4,1.
„ 82 „ 24 v. o. „ 1,04 statt 0,55.